Modélisation des déplacements d'animaux dans un espace géographique - analyse et simulation

Laurence Jolivet

▶ **To cite this version:**

Laurence Jolivet. Modélisation des déplacements d'animaux dans un espace géographique - analyse et simulation. Géographie. Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 2014. Français. NNT : . tel-01089808

HAL Id: tel-01089808
https://paris1.hal.science/tel-01089808

Submitted on 2 Dec 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

Présentée pour l'obtention du grade de
Docteur de l'Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne
Spécialité : Géographie
École Doctorale de Géographie de Paris

Laurence JOLIVET

MODÉLISATION DES DÉPLACEMENTS D'ANIMAUX
DANS UN ESPACE GÉOGRAPHIQUE - ANALYSE ET SIMULATION

Soutenue publiquement le 20 mai 2014 devant le jury composé de :

Jean-Christophe Foltête	Professeur	Université de Franche-Comté	Rapporteur
Didier Josselin	Directeur de recherche	CNRS UMR ESPACE Avignon	Rapporteur
Philippe Clergeau	Professeur du MNHN	UMR 5173 Muséum Paris	Examinateur
Danielle Marceau	Professeur	Université de Calgary	Examinatrice
Sonia Saïd	Ingénieur ONCFS	CNERA Cervidés-Sanglier	Examinatrice
Marianne Cohen	Maître de conférences	Université Paris Diderot	Directrice
Anne Ruas	IPEF	IFSTTAR Marne-la-Vallée	Directrice

La thèse a été préparée sur les sites suivants :

- le Laboratoire COGIT de l'Institut national de l'information géographique et forestière
73 avenue de Paris, 94160 Saint-Mandé, France

- l'Institut de Géographie
191 rue Saint Jacques, 75005 Paris

- le Pôle Image, Université Paris Diderot – Paris 7, UFR GHSS
Bâtiment Olympe de Gouges, 75205 Paris Cedex 13

REMERCIEMENTS

Cette thèse doit sa réalisation à de nombreuses personnes et c'est ici une opportunité de les remercier.

Tout d'abord, mes premiers remerciements vont à mes directrices, Anne Ruas qui m'a proposé ce sujet passionnant et qui m'a aidé à définir un cadre clair de mise en œuvre, et Marianne Cohen qui m'a transmis son savoir et initié à de nouvelles thématiques. Cette thèse doit beaucoup à leur codirection. Je remercie également l'IGN, en particulier Bénédicte Bucher pour la Recherche et le laboratoire COGIT et Sébastien Mustière pour m'avoir permis de travailler dans un environnement accueillant. Je remercie de même l'École Doctorale de Géographie de Paris, l'Université Panthéon-Sorbonne et les personnes responsables pour leur disponibilité.

Je tiens ensuite à remercier les membres du jury qui ont accepté de lire le mémoire et de donner leur avis : le président du jury Philippe Clergeau et les examinatrices Sonia Saïd et Danielle Marceau, ainsi que les rapporteurs Jean-Christophe Foltête et Didier Josselin pour leurs remarques détaillées qui me permettent d'aborder mon travail d'un point de vue différent.

J'adresse un grand remerciement aux personnes et à leurs organismes qui m'ont fourni les données sur les déplacements d'animaux et sans qui je n'aurais pu réaliser cette thèse : à l'ELIZ et notamment Vincent Raton qui m'a transmis leurs suivis de renards et a représenté un premier contact avec les études sur la faune sauvage, à Emmanuelle Robardet qui m'a fait confiance quant à l'utilisation de ses relevés enregistrés dans le cadre de l'Anses, à Sonia Saïd de l'ONCFS et Philippe Landry de ce même office pour m'avoir accueilli et accepté de mettre en place un partenariat, et enfin à Nicolas Morellet, Mark Hewison et leurs collègues de l'INRA pour m'avoir offert l'occasion d'assister au suivi des chevreuils et pour m'avoir donné accès à leur base de données. Tous ces échanges m'ont énormément apporté.

Je remercie les relecteurs de mon mémoire sur qui j'ai pu me reposer en fin d'écriture : Nathalie, Élodie – avec la famille Azéma – et mes parents. Merci également aux chanceux désignés des répétitions de soutenance : Élodie, Mickaël, Ana-Maria, Cécile et Sébastien.

Un grand merci aux personnes qui ont facilité le déroulement de la thèse : Marie-Claude Foubert, Mounia Ahmedi, Alain Sombris, David Correia pour leur disponibilité et leur efficacité, Didier Laronce et Véronique Rousselle pour l'impression du mémoire, Odile Dieda et l'équipe de l'ENSG pour l'organisation de la soutenance.

Je remercie chaleureusement les personnes et les services de l'IGN associés qui ont accepté de me présenter leurs travaux et d'y accéder, les équipes au SBV et à l'IGN Conseil notamment, ainsi qu'au service de diffusion des données.

Cette thèse étant à la croisée de différentes disciplines, j'ai fait appel à plusieurs personnes qui m'ont accordé de leur temps afin de répondre à mes questions et qui m'ont fourni de précieuses informations, en particulier : Pierre-Eymard Biron du PNR du Vercors, Éric Guinard du CETE du Sud-Ouest, Rémi Helder du CERFE, Julien Jemin du GMHL, Romain Julliard du MNHN, François Klein du CNERA Cervidés-Sanglier de l'ONCFS, Jean-François Langumier de l'APRR, Alain Morand du Parc national du Mercantour, Jean-Michel Pirastru du PNR des Alpilles, Céline Richomme de l'Anses, Sandrine Ruette du CNERA Petits carnivores. Je remercie pareillement les autres personnes qui ont fait suite à mes demandes de renseignements.

Je souhaite remercier tous les membres du COGIT : mes collègues de bureau Cécile et Ana-Maria sur qui j'ai pu et je peux toujours compter, Élodie pionnière des déplacements d'animaux au laboratoire, Mickaël et son aide sur GeOxygene 3D, Julien et Bertrand conseillers en agents,

Marie-Dominique qui m'a fait gagner beaucoup de temps informatique, aux prédécesseurs Patrick, Jean-François, Jeff (ou inversement), Jérémy, Carmen et son soutien sans faille, Éric G. pour ses idées et sa disponibilité et Éric M. pour ses idées et ses quiz, Catherine pour les discussions diverses et variées, Sidonie pour ses encouragements, et pour leurs conseils et leur aide Nathalie, Sébastien, Guillaume, les « nouveaux » Yann, Arnaud, Shuang, Saul, une pensée bien sûr pour tous les doctorants pour lesquels je vais pouvoir assister à la soutenance un peu plus tranquillement : Kusay, Bertrand, Firas, Anna, Charlotte, Benoît, Geoffrey, Adrien, Abdel, Jérémie… En espérant ne pas en oublier ! J'ai également eu la chance d'être intégrée dans l'équipe de recherche du LADYSS. Je remercie ainsi tous ceux qui m'ont apporté leur aide et leur soutien, entre autres Milena, Étienne, Clélia, et Sarah et Gwenaëlle bientôt les prochaines à soutenir.

Pour terminer, mes remerciements vont à mes amis et à ma famille, assurément aussi contents que moi que cette thèse ait pu être menée à bien.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION GÉNÉRALE……13

CHAPITRE I – ÉTAT DE L'ART ET DÉFINITION DE LA PROBLÉMATIQUE

1) LES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX LIÉS AUX DÉPLACEMENTS DES ANIMAUX 19

1.1. LES ANIMAUX DANS LES SYSTÈMES SOCIÉTÉ-NATURE 19
1.1.1. Les rapports entre les hommes et la faune 19
1.1.2. La participation de la faune à la structure et au fonctionnement des écosystèmes 25
1.2. L'INFLUENCE DU PAYSAGE SUR LA FAUNE ET SES DÉPLACEMENTS 29
1.2.1. Les notions d'espace, de paysage et d'éléments du paysage 29
1.2.2. Les relations entre composition et configuration des paysages et la faune 31
1.2.3. Les relations entre éléments du paysage et déplacements 33
1.2.4. Les effets des changements environnementaux et des aménagements sur la faune 43

2) LES CONNAISSANCES SUR LES DÉPLACEMENTS D'ANIMAUX ET LEUR INTÉGRATION EN AMÉNAGEMENT 46

2.1. LES DÉPLACEMENTS D'ANIMAUX ET LES CONTRAINTES SPATIALES 46
2.1.1. Les différents aspects des déplacements de la faune 46
2.1.2. Connaître les déplacements pour mieux aménager le territoire 52
2.1.3. Les méthodes de suivis des déplacements d'animaux 53
2.1.4. Les données géographiques utilisées pour étudier les variables environnementales 61
2.1.5. Les analyses des déplacements pour la compréhension de l'influence de l'espace 62
2.2. AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE EN FAVEUR DES DÉPLACEMENTS DE LA FAUNE 69
2.2.1. Des théories de la conservation à la mise en place des aménagements 69
2.2.2. Les méthodologies 73
2.2.3. La mise en place de mesures de protection de la faune sur le territoire 86

3) LA MODÉLISATION DE L'ESPACE ET DES DÉPLACEMENTS DE LA FAUNE : PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS DE LA THÈSE 94

3.1. LA CARACTÉRISATION DE L'INFLUENCE DE L'ESPACE SUR LES DÉPLACEMENTS D'ANIMAUX À PARTIR DES DONNÉES EXISTANTES : DÉFINITION DE LA PROBLÉMATIQUE 94
3.1.1. Intérêts de la compréhension des déplacements de la faune sauvage 94
3.1.2. Qualifier l'apport des données géographiques dans les déplacements 97
3.2. LA MODÉLISATION DES CONNAISSANCES ET DES DONNÉES SUR LES RELATIONS ENTRE ESPACE ET ESPÈCES : LE CONTEXTE DE L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE 99
3.2.1. Des cas d'étude particuliers pour contribuer à des connaissances générales 99
3.2.2. La représentation des connaissances et leur utilisation dans les projets d'aménagement 101
3.3. OBJECTIFS DE LA THÈSE ET HYPOTHÈSES DE RECHERCHE 102
3.3.1. Les objectifs d'analyses et de simulations des déplacements et de l'espace 102
3.3.2. Énoncé des hypothèses 104

RÉSUMÉ DE LA PROBLÉMATIQUE ET DU POSITIONNEMENT DE LA THÈSE 106

CHAPITRE II – PRÉSENTATION DES CAS D'ÉTUDE ET DE L'APPROCHE

INTRODUCTION 107

1) L'APPROCHE GÉNÉRALE PROPOSÉE 109

1.1. La démarche globale 109
1.2. L'analyse des déplacements 112
1.3. La simulation des déplacements en fonction des espèces et des éléments du paysage 115

2) PRÉSENTATION DES SITES ET DES ESPÈCES ANIMALES ÉTUDIÉES 119

2.1. Présentation des cas d'étude 119
2.1.1. Les sources des données et les contextes des cas d'étude 119
2.1.2. Sélection des cas d'étude 123
2.2. Description des sites géographiques et des animaux suivis 127
2.2.1. Ville et périphérie de Pontarlier 127
2.2.2. Ville et périphérie d'Annemasse 128
2.2.3. L'agglomération de Nancy 130
2.2.4. La RNCFS de La Petite Pierre 132
2.2.5. Le canton d'Aurignac 134
2.3. Connaissances sur le comportement des espèces étudiées 135
2.3.1. Le renard roux 136
2.3.2. Le chevreuil 140
2.3.3. Le cerf élaphe 144

3) LES DONNÉES UTILISÉES ET LES ÉTAPES DE LA DÉMARCHE MÉTHODOLOGIQUE 149

3.1. Les données de déplacements d'animaux 149
3.2. Description des données géographiques 154
3.3. La méthodologie proposée 162
3.3.1. Caractérisation des déplacements et des lieux parcourus 162
3.3.2. Le modèle de simulation et les effets des aménagements sur les déplacements 167
3.4. Les ressources logicielles utilisées 170

RÉSUMÉ DES CAS D'ÉTUDE ET DE L'APPROCHE 174

CHAPITRE III – ANALYSE DES DÉPLACEMENTS DE LA FAUNE ET DE L'INFLUENCE DES ÉLÉMENTS DU PAYSAGE

INTRODUCTION 175

1) ANALYSE DES DÉPLACEMENTS À PARTIR DES LOCALISATIONS DES ANIMAUX 176

1.1. Description et cartographie des données de localisations d'animaux 176
1.1.1. Contexte environnemental des localisations enregistrées 176
1.1.2. Contenu des données de localisations 178
1.2. L'estimation des domaines vitaux et des espaces parcourus 181
1.2.1. Caractéristiques des espaces parcourus par espèce et par cas d'étude 183
1.2.2. Comparaison des estimations des espaces parcourus selon deux méthodes 186
1.2.3. Étude des différences interindividuelles 188
1.3. Construction des trajectoires linéaires et description géométrique 191
1.3.1. Interpolation des localisations en trajectoires 191
1.3.2. Calcul d'indices de description de la géométrie des trajectoires 192
1.3.3. Le positionnement relatif des animaux à partir des trajectoires 196
1.4. Caractérisation des déplacements 198

1.4.1. Les rythmes de déplacements *198*
1.4.2. Les différents types de déplacements *202*

2) LA PRISE EN COMPTE DE L'ESPACE : L'INFLUENCE DES ÉLÉMENTS DU PAYSAGE SUR LES ANIMAUX 209

2.1. DESCRIPTION DE LA SITUATION DES ANIMAUX PAR RAPPORT AUX ÉLÉMENTS DU PAYSAGE 209
2.1.1. Étude du relief dans lequel se situent les animaux *210*
2.1.2. Présence des animaux dans les types d'occupation du sol *214*
2.1.3. Analyse de la proximité des animaux aux éléments du paysage *219*
2.1.4. Les éléments du paysage traversés *223*
2.2. RECHERCHE DE COMPORTEMENTS DE SÉLECTION SPATIALE LORS DES DÉPLACEMENTS : LA SÉLECTION DU TYPE D'HABITAT .. 229
2.2.1. L'habitat sélectionné par les renards en milieu périurbain *230*
2.2.2. Les caractéristiques de l'habitat des cervidés en milieu forestier *236*
2.2.3. Les chevreuils en zone agricole et forestier fragmenté *242*
2.3. LE RÔLE DES ÉLÉMENTS DU PAYSAGE SUR LES DÉPLACEMENTS 243
2.3.1 La situation des animaux par rapport à leur domaine de vie *243*
2.3.2. Les éléments du paysage parcourus et évités par les animaux lors de leurs déplacements par rapport à la composition de leur espace parcouru *244*
2.3.3. Le rôle des éléments du paysage sur les déplacements quotidiens et sur les déplacements de longues distances : cas des chevreuils sur le site d'Aurignac *249*
2.4. ENRICHISSEMENT DES INTERPRÉTATIONS SUR LES RELATIONS ENTRE LES ÉLÉMENTS DU PAYSAGE ET LES DÉPLACEMENTS PAR DES SOURCES D'INFORMATIONS COMPLÉMENTAIRES 257
2.4.1. La mise en perspective des résultats avec un travail de terrain *257*
2.4.2. Des bases de données complémentaires pour la description des espaces parcourus *262*
2.5. VALIDATION PAR UNE APPROCHE STATISTIQUE DES RÉSULTATS OBTENUS SUR LES RELATIONS PAYSAGE/DÉPLACEMENTS 266
2.5.1. Proposition de l'approche statistique *266*
2.5.2. Les relations entre les éléments du paysage et les déplacements des individus de cervidés en milieu forestier *269*
2.5.3. Les relations entre les éléments du paysage et les déplacements des renards en milieu périurbain *278*

3) DISCUSSION SUR LES RÉSULTATS D'ANALYSES ET SYNTHÈSE 292

3.1. LA DÉTERMINATION DES DISTANCES ET DES RYTHMES DE DÉPLACEMENTS 292
3.1.1. L'estimation des domaines vitaux et des espaces parcourus *292*
3.1.2. Les rythmes de déplacements *293*
3.2. LA CARACTÉRISATION DES ÉLÉMENTS DU PAYSAGE INFLUENÇANT LES DÉPLACEMENTS 296
3.2.1. La caractérisation des préférences spatiales *297*
3.2.2. Les chemins empruntés par les animaux *299*
3.2.3. L'appréhension de l'espace par les animaux lors des différents types de déplacements et l'apport de l'analyse paysagère *301*
3.2.4. Retour sur la précision et les spécifications des localisations et des données géographiques *305*

RÉSUMÉ DE L'INFLUENCE DES ÉLÉMENTS DU PAYSAGE SUR LES DÉPLACEMENTS 311

CHAPITRE IV – PROPOSITION D'UN MODÈLE DE SIMULATION DES DÉPLACEMENTS DE LA FAUNE EN FONCTION DE L'ESPACE ET EXPÉRIMENTATIONS

INTRODUCTION 313

1) DÉFINITION DU MODÈLE CONCEPTUEL DE DONNÉES 315

1.1. DÉFINITION DU VOCABULAIRE UTILISÉ 315
1.2. PROPOSITION D'UN MODÈLE DE DONNÉES DE CARACTÉRISATION DES RELATIONS ENTRE L'ESPACE ET LES DÉPLACEMENTS 321

2) PROPOSITION D'UN MODÈLE DE SIMULATION DES DÉPLACEMENTS D'ANIMAUX 329

2.1. L'APPROCHE AGENT : APPLICATIONS EXISTANTES ET POSITIONNEMENT 329
2.1.1. Les applications orientées agent en écologie *330*

2.1.2. Nos choix de modélisation en approche agent *332*
2.2. La définition des agents et de leur environnement spatial dans notre modèle 334
2.2.1. Les propriétés et les comportements des agents *335*
2.2.2. La définition de l'environnement spatial et sa prise en compte par les agents *340*
2.3. Les méthodes et les algorithmes développés 343
2.3.1. La stratégie d'un agent en correspondance avec l'enchaînement des méthodes *343*
2.3.2. Les algorithmes de construction de trajectoires par un agent *348*
2.4. L'implémentation informatique du modèle orienté agent 363

3) EXPÉRIMENTATIONS ET ANALYSE CRITIQUE DU MODÈLE EN VUE DE SON AMÉLIORATION 369

3.1. Simulation de trajectoires et comparaison avec les déplacements observés : le cas des renards en milieu périurbain 370
3.2. Simulation des trajectoires pour les cervidés en milieu forestier 381
3.3. Sensibilité du modèle de simulation et propositions d'améliorations 388
3.3.1. Étude de la sensibilité du modèle *388*
3.3.2. Propositions d'améliorations des comportements agent modélisés *392*
3.4. Test sur l'environnement agent : ajout des barrières en milieu périurbain pour les renards 396
3.5. Simulation de déplacements pour trois espèces animales sur un même site d'étude 399

4) ÉVALUATION DES EFFETS DES MODIFICATIONS DE L'ESPACE SUR LES DÉPLACEMENTS SIMULÉS 405

4.1. Présentation des scénarios d'aménagement 406
4.2. Le scénario de référence : les simulations de déplacements vers des destinations fixées sur un espace non modifié 410
4.3. Les scénarios d'aménagements pour des déplacements vers des destinations fixées 414
4.4. Modification de l'importance du rôle de barrière de la nouvelle route pour les simulations de déplacements exploratoires 419

5) SYNTHÈSE ET DISCUSSION SUR LES RÉSULTATS DE SIMULATION 423

5.1. Discussion sur le modèle proposé et l'implémentation du modèle orienté agent 423
5.1.1. Les choix de modélisation *423*
5.1.2. La définition du modèle de simulation *424*
5.1.3. Implémentation du modèle de simulation *427*
5.2. Retours sur les simulations de déplacements et de modifications de l'espace 431
5.2.1. La simulation des trajectoires *431*
5.2.2. Évaluation des effets d'aménagements *433*
5.2.3 Utilisation des données géographiques pour la simulation *433*

RÉSUMÉ DU MODÈLE DE SIMULATION 435

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

1) SYNTHÈSE DES RÉSULTATS ET CONCLUSIONS 437

1.1. L'intérêt de l'approche globale 437
1.2. La caractérisation de l'influence du paysage sur les déplacements de faune 439
1.3. L'apport de la modélisation et des simulations de trajectoires 441
1.4. La pertinence des données géographiques dans la prise en compte des déplacements de faune 443
1.5. L'implémentation du module informatique 445

2) LES PERSPECTIVES DE LA THÈSE 448

2.1. Les améliorations possibles de l'approche proposée et des méthodes développées 448
2.2. Les perspectives d'applications et de recherches 453

BIBLIOGRAPHIE……**457**

PUBLICATIONS……**495**

ANNEXES

ANNEXE 1 – CARTOGRAPHIE DES SITES D'ÉTUDE ET DES SUIVIS DES ESPÈCES ANIMALES..... 498

ANNEXE 2 – DESCRIPTION DES ÉCHANTILLONS DE LOCALISATIONS DES ANIMAUX 505

ANNEXE 3 – LES MÉTHODES DE CAPTURE DES ANIMAUX POUR LES SUIVIS 509

ANNEXE 4 – LES ALTITUDES ET LES PENTES SUR LE SITE D'ÉTUDE DES VOSGES DU NORD 511

ANNEXE 5 – LES PEUPLEMENTS FORESTIERS CORRESPONDANT AUX LOCALISATIONS PAR CHEVREUIL ET PAR CERF DANS LES VOSGES DU NORD 512

ANNEXE 6 – LES DISTANCES MINIMALES DES LOCALISATIONS AUX VOIES DE COMMUNICATION SELON LEUR TYPE – CAS DES CERVIDÉS DANS LES VOSGES DU NORD 513

ANNEXE 7 – ÉTUDE DES TRAVERSÉES DES VOIES PAR LA CARTE TOPOLOGIQUE 514

ANNEXE 8 – LES ALTITUDES ET LES PENTES POUR LES CAS D'ÉTUDE SUR LES RENARDS 515

ANNEXE 9 – EFFET DE LA DISTANCE DU VOISINAGE CONSIDÉRÉE ET COMPARAISON ENTRE L'ESPACE AUTOUR DES LOCALISATIONS ET L'ESPACE DANS LE DOMAINE VITAL ESTIMÉ 516

ANNEXE 10 – EXTRACTION DES HAIES ET DES BOSQUETS 518

ANNEXE 11 – ÉVALUATION DES EFFETS D'AMÉNAGEMENTS – CAS DU CHEVREUIL ET DU CERF..... 520

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La gestion de la faune sauvage par la société revêt des formes diverses qui vont parfois dans des directions opposées, entre les mesures de protection et les actions de réduction des populations animales. La faune suscite des débats lorsque l'on porte atteinte à son intégrité et que l'on modifie ses milieux de vie. Les démarches pour résoudre les conflits entre la société et la faune sauvage nécessitent de trouver des compromis entre le développement des infrastructures et des activités anthropiques, et l'utilisation de l'espace par les animaux. Dans ce contexte, les décisions en aménagement du territoire prennent en compte la préservation de l'environnement de différentes manières : par des zones protégées strictes ou par des installations et des agencements des éléments du paysages intégrés dans l'espace préexistant.

La biodiversité fait référence au monde vivant à différentes échelles, du gène à l'écosystème. Dans une région définie, elle désigne notamment la richesse en quantité et en variété des espèces végétales et animales. Dans notre thèse, nous abordons cette notion par la mobilité de la faune. La fluidité des déplacements des animaux est garant du bon fonctionnement des écosystèmes et du maintien de la biodiversité. Nous nous intéressons en particulier au rôle de l'espace dans les déplacements. Par exemple, la fragmentation des paysages peut avoir des conséquences sur les déplacements des animaux car elle entraîne la diminution du nombre et de la taille des lieux de vie ainsi que l'apparition d'obstacles. Les espèces animales adaptent plus ou moins bien leur comportement à ces changements. Une question en aménagement du territoire est de déterminer comment mieux décrire l'espace afin de représenter les effets des modifications du paysage sur les déplacements et à terme de proposer des mesures compensatoires. La problématique de notre thèse porte sur la caractérisation de l'influence des éléments de l'espace sur les déplacements des animaux à partir des bases de données géographiques à grande échelle spatiale et de localisations connues d'individus.

La distribution des espèces animales et leurs dynamiques spatiales sont liées aux types d'occupation du sol ainsi qu'aux activités humaines. Leur étude fait appel à des données de description de l'espace. Les interactions entre la faune et l'espace se révèlent par la présence et la densité des populations animales ainsi que par la situation des individus par rapport aux éléments de cet espace aussi divers que des arbres, des prairies ou des routes. À une échelle temporelle fine, les animaux peuvent choisir de se diriger vers un objectif spatialisé qui est associé à une motivation particulière. Ils empruntent un certain trajet pour atteindre cet objectif en effectuant des compromis entre facilité de cheminement, camouflage et intérêt potentiel situé sur le trajet. Des éléments du paysage localisés peuvent alors jouer un rôle, comme un rocher qui fait obstacle, sans que ces éléments n'aient d'incidence sur le choix du lieu de vie des animaux. Les déplacements peuvent s'effectuer sur des sites connus par les animaux. Ils peuvent également s'étendre sur de longues distances, ce qui rend plus probable la traversée de milieux différents par les individus que ce soit lors de migrations ou de déplacements exploratoires. Ces différents types de déplacements sont à prendre en compte dans les analyses des interactions. Ils sont fonction des espèces animales, de leurs capacités et de leurs besoins.

Notre travail de recherche est de caractériser la mobilité spatiale des individus en fonction des caractères de l'espace. En géographie, la mobilité spatiale concerne principalement les personnes, leurs activités et leurs modes de déplacement. Les trajets peuvent être étudiés selon les réseaux de transports ou selon des lieux d'intérêt comme des bâtiments particuliers. L'intensité de la fréquentation de certains lieux est une approche en aménagement du territoire afin d'identifier les relations entre l'offre d'infrastructures de services (transport, commerces) et l'occupation humaine. Pour la faune, les motivations aux déplacements et les chemins empruntés ne sont pas explicitement connus et ils viennent d'hypothèses formulées à partir d'observations. Les déplacements des animaux sont motivés par un intérêt comme la présence de congénères ou de ressources alimentaires. Les individus adaptent ensuite leurs chemins en fonction des obstacles rencontrés et des éléments du paysage intéressants pour se déplacer tout en étant peu visibles. Les capacités de déplacement permettent aux individus de répondre à des besoins élémentaires comme lors de leurs activités quotidiennes. Elles leur permettent également de s'adapter à certaines modifications dans l'environnement. Les migrations temporaires ou définitives sont des manières de s'adapter aux modifications saisonnières ou permanentes de l'environnement. Les rythmes des déplacements et l'enchaînement des activités des animaux sont à considérer lors de l'interprétation des déplacements, en plus de l'influence de certains éléments du paysage et de certaines configurations de l'espace.

Notre objectif principal est de proposer une modélisation de l'espace géographique et des déplacements de la faune. Nous souhaitons nous appuyer sur cette modélisation afin d'implémenter un outil de simulation des trajectoires en fonction des comportements de déplacement des espèces animales et en fonction de l'espace. Cet outil doit permettre de tester les effets des aménagements par la comparaison entre les trajectoires simulées avant puis après les aménagements. Il doit être au préalable validé en confrontant les résultats de simulations avec les trajectoires issues d'observations. Notre objectif se positionne en géomatique. Nous cherchons à voir si l'utilisation et l'analyse des données géographiques et des localisations permettent de mettre en place de meilleurs aménagements pour les déplacements. Nous souhaitons qualifier l'apport des bases de données géographiques dans la compréhension des choix de trajets des animaux. Afin de définir une modélisation des concepts en jeu, il est nécessaire d'identifier par où les animaux passent, ce qui gênent leurs déplacements et ce qui les facilitent. Nous considérons les animaux individuellement et nous adoptons une démarche afin d'étudier leur parcours de l'environnement spatial. Nous proposons une caractérisation de l'influence des éléments ainsi qu'une caractérisation des déplacements. La simulation de trajectoires requiert d'arrêter les bons paramètres pour obtenir des résultats de simulations pertinents ; dans notre cas en particulier, les résultats concernent les lieux de passages et l'appréhension des animaux par rapport aux éléments du paysage.

Les enjeux de la thèse portent sur l'intérêt des différentes sources de données – sur les animaux et sur l'espace – afin de caractériser les déplacements par rapport aux éléments du paysage. Ils portent également sur l'utilisation des connaissances des déplacements dans un module de simulation. Nous identifions les enjeux majeurs suivants.

- L'adéquation entre la précision des bases de données géographiques et les études sur la faune sauvage.

L'intégration de données de sources hétérogènes est nécessaire afin de mettre en avant les préférences spatiales des animaux lors des trajets réalisés. Les sources d'informations

concernent des entités différentes, individus ou éléments de l'espace, et leurs propriétés respectives. Les animaux se distinguent par des caractéristiques physiques et biologiques et par leurs localisations successives. Ces localisations permettent d'estimer un tracé des déplacements plus ou moins précisément. La description de l'espace s'organise en thèmes correspondant aux types d'occupation du sol. Elle correspond elle-même à une certaine précision spatiale et attributaire. Un enjeu est alors de voir s'il est possible de mettre en évidence des relations spatiales par l'intégration des thèmes géographiques et des localisations dans un SIG.

- Les types de déplacements et les préférences spatiales.

Les animaux ont des rythmes de déplacements particuliers selon leurs activités. On peut parler de type de mobilité. Une forte mobilité correspond à des déplacements rapides et peu d'arrêts, alors qu'une faible mobilité peut être associée à une exploitation de l'espace et donc à un intérêt pour stationner. L'enjeu d'identifier les préférences spatiales selon les types de mobilité réside dans le fait que les individus utilisent les éléments du paysage selon leur intérêt. Les animaux peuvent toutefois traverser des éléments associés à un faible apport en ressources mais présentant un intérêt pour se déplacer ou pour s'y réfugier.

- L'identification des obstacles.

Avec le développement des constructions et des infrastructures anthropiques, l'enjeu est d'identifier les éléments du paysage qui font obstacle aux déplacements. Cette identification est importante afin de proposer des mesures compensatoires de préservation des besoins des espèces animales et d'éviter les déséquilibres dans la répartition des populations.

- L'utilisation des connaissances dans l'aménagement du territoire.

Les connaissances sur les comportements des animaux et sur l'influence des éléments du paysage peuvent être formalisées pour être réutilisées lors de projets d'aménagements du territoire. Les modifications du paysage forcent les espèces animales à s'adapter, que ce soit par l'apparition d'éléments a priori défavorables aux animaux ou alors intéressants au niveau de l'habitat ou comme corridors de déplacement. La modélisation des concepts sur les relations espèce-espace est une étape essentielle pour mieux prendre en compte les différentes composantes du territoire. Dans notre objectif de définir une modélisation de l'espace et des déplacements afin de pouvoir simuler des trajectoires, il s'agit de déterminer les connaissances à formaliser et à traduire par des paramètres.

Nous commençons par aborder la problématique concernant l'influence de l'espace sur les déplacements de la faune en effectuant un état de l'art général. Cet état de l'art recense des recherches sur les animaux eux-mêmes et sur le rapport de la société à la nature et à la faune sauvage (chapitre I). La manière dont est considérée la faune influence sa gestion par les hommes notamment dans les zones de conflits potentiels. Notre contexte d'étude est celui de la prise en compte des déplacements de la faune et de l'utilisation d'une description de l'espace à grande échelle dans l'aménagement du territoire. Nous répertorions les diverses approches de caractérisation des effets des éléments du paysage sur la faune et par la suite les approches qui sont exploitées dans l'évaluation des effets des aménagements. Nous présentons les démarches pour intégrer les besoins de la faune sur des territoires occupés et modifiés par la société. La définition de modèles théoriques et leur mise en application sur le terrain sont exposées. Nous nous situons du côté de la définition d'une modélisation théorique des déplacements et de

l'espace. Nous faisons appel à des données de suivis d'animaux en amont de cette modélisation et son application vise à aider des décisions d'aménagements concrets.

Dans plusieurs sites en France, des protocoles d'observations des espèces animales ont été appliqués afin de déterminer les effets sur la répartition et les mouvements des animaux de certains éléments du paysage comme les routes ou la végétation. Ces études ont pour but de réunir un nombre suffisant d'observations et de réussir à séparer les facteurs d'influence. Un des enjeux dans la prise en considération des relations entre la faune et l'espace est en effet de distinguer les facteurs qui dépendent des individus et du type d'espace considéré des facteurs d'influence pouvant être généralisables à l'espèce quel que soit le site. Dans notre thèse, nous ne cherchons pas à identifier de nouvelles influences du paysage sur la faune. Nous ne menons pas nous-mêmes de suivis sur le terrain mais nous utilisons des observations existantes provenant d'études sur les relations entre faune, société et environnement spatial. Les cas d'étude sur lesquels nous nous sommes penchés correspondent à des suivis menés par des organismes publics : ELIZ, Anses, ONCFS, INRA. Ces cas se rapportent à des milieux divers qui ont une couverture différente dans les bases de données à grande échelle spatiale, notamment dans les bases de données topographiques produites par l'IGN (chapitre II). Il s'agit de sites d'étude avec une présence de dérangements anthropiques plus ou moins importante, ainsi que des occupations de sol plus ou moins artificialisées. Trois espèces sont étudiées : le renard, le chevreuil et le cerf, espèces qui ont des comportements et des déplacements variés. Les suivis sur ces espèces sont effectués individuellement à l'aide de colliers qui permettent de récupérer leurs localisations à des instants connus. Nous avons entre autres accès à des traces GPS de fréquence temporelle élevée afin d'approcher au mieux les trajets effectués.

Notre approche consiste à utiliser des données sur les déplacements d'animaux et à chercher à caractériser les chemins empruntés à l'aide d'une description des éléments du paysage à grande échelle spatiale. Nous prenons en compte plusieurs espèces et plusieurs types d'espace grâce aux partages avec des équipes d'écologues. Nous cherchons à proposer des étapes méthodologiques adaptées à l'ensemble des cas d'étude permettant de formuler des hypothèses sur les relations entre déplacement et paysage puis d'évaluer les conséquences d'aménagements sur les déplacements. Nous nous concentrons dans nos recherches sur l'influence des éléments du paysage sur les déplacements d'animaux, et non l'inverse. Dans notre mise en œuvre, les relations sont donc unilatérales et nous n'abordons pas les modifications apportées par les animaux sur les éléments du paysage. Les interactions entre les individus et entre les espèces animales ne sont pas non plus traitées. Les interactions entre la société et les animaux sont étudiées à travers les éléments du paysage et l'aménagement du territoire.

La première partie de notre approche consiste à déterminer quelles sont les caractéristiques des déplacements des animaux. Nous mentionnons la littérature sur le comportement des espèces (chapitre II). Nous cherchons ensuite à extraire des relations entre l'emplacement des animaux et leur voisinage spatial. Les interprétations de ces relations peuvent être énoncées à partir des résultats d'analyse spatiale et statistique et à partir des connaissances des écologues (chapitre III). Cette approche nécessite de modéliser les déplacements des animaux qui sont des actions continues, grâce à des informations ponctuelles. Elle fait appel également à une connaissance du terrain car la description de l'espace dans les bases de données n'est pas complète.

À l'aide de la caractérisation des relations entre espace et déplacements, nous souhaitons pouvoir représenter les déplacements des animaux par une modélisation de leurs comportements et de leur environnement spatial. Nous proposons un modèle orienté agent afin de construire des trajectoires d'animaux définies par les contraintes intrinsèques des animaux et les contraintes de l'espace (chapitre IV). La proposition d'un tel modèle de simulation a pour but de tester d'une part des hypothèses sur les déplacements en modifiant les comportements implémentés, et d'autre part de simuler des aménagements et de visualiser leurs effets sur les déplacements simulés.

CHAPITRE I
–
ÉTAT DE L'ART ET DÉFINITION DE LA PROBLÉMATIQUE

1) LES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX LIÉS AUX DÉPLACEMENTS DES ANIMAUX

Les animaux font partie de l'environnement des hommes. Ils ont joué et jouent un rôle dans les domaines économiques et culturels. Leur mobilité est une caractéristique fondamentale pour comprendre leur importance auprès des hommes. Leurs déplacements restent pourtant partiellement connus quant à leurs parcours et à leurs motivations. Nous commençons l'état de l'art par un bref aperçu des rapports entre la société et les animaux, dans leur diversité et leur caractère évolutif. Nous présentons ensuite les connaissances sur les relations entre les déplacements de la faune et son environnement.

1.1. Les animaux dans les systèmes société-nature

1.1.1. Les rapports entre les hommes et la faune

L'intérêt de l'homme face à la nature et face à la faune

Les rapports entre l'homme et l'animal peuvent tout d'abord être considérés sous l'angle de l'attachement de l'homme envers l'animal. Cet attachement provient de l'utilité que représentent les différentes espèces animales, comme le sont les ressources naturelles. Il résulte aussi d'un intérêt de l'homme pour la faune. L'intérêt est d'autant plus fort au vu de la proximité entre l'homme et l'animal due à l'appartenance à un même règne[1]. La correspondance comportementale et la relation avec l'homme apparaissent ainsi très fortes avec les autres primates ou avec des espèces qui ont été domestiquées telles le chien ou le chat. Les comportements des animaux perçus comme anthropomorphiques renvoient à l'homme une image qui l'interpelle. La faune fait également l'objet d'admiration, pour son apparence et ses capacités. Cela peut par exemple être le cas pour la grande faune, telles certaines espèces de félin ou des animaux de chasse et de trophée comme les antilopes ou les cervidés (Tesnière, 2005). La faune s'inscrit dans une nature qui suscite des sentiments ambivalents de « communion intime » et de peur, comme étudié par Chanvallon (2009). La crainte vis-à-vis de la faune peut provenir de rapports conflictuels. Certaines espèces sont considérées comme nuisibles du fait de leur compétition potentielle avec l'homme (Lang, 2009 ; Johansson, 2009) et du partage d'un espace commun (Marchand, 2012 [a]). Des espèces peuvent cristalliser des

[1] Le règne animal se définit généralement en parallèle d'autres règnes dont le règne végétal. Il correspond au niveau supérieur de la classification des êtres vivants.

craintes comme par exemple le loup (Moriceau & Madeline, 2010). Blanc & Cohen (2002) soulignent l'importance de l'animal dans les études en géographie : l'animal est intégré à des études de géographie physique ainsi qu'à des analyses de la société dans des problématiques culturelles et environnementales.
Les réflexions sur les différences entre l'homme et la faune font débat, avec des résonances plus ou moins théologiques (Gouabault, 2012). La réflexion sur la place de l'homme et des sociétés dans leur environnement porte encore aujourd'hui sur l'intégration réciproque de la culture et de la nature (Boissonade & Hackenberg, 2011). Les ressemblances génèrent de la fascination comme des ressemblances de postures ou de comportements. Les formes de communication entre hommes et animaux posent des interrogations. Les interactions entre les hommes et les animaux sont par ailleurs riches et diverses. Nous abordons ces interactions sous l'angle de cette diversité qui a évolué au cours de l'histoire, en fonction des espèces et des lieux.

Les représentations des animaux par l'homme sont anciennes. Elles montrent l'intérêt et l'importance de leur rôle dans les sociétés humaines. Les peintures rupestres illustrent la place que tenait la faune dans la vie quotidienne des hommes. La dimension cynégétique est incluse dans ces peintures parfois désignées comme « l'art des chasseurs-cueilleurs ». L'aspect spirituel entre aussi dans les interprétations de ces peintures préhistoriques (Sauvet *et al.*, 2010). Par la suite, la mythologie antique a placé les animaux au cœur des représentations et des rites religieux. Des divinités anthropomorphes et des espèces sacrées montrent cette considération. Le bestiaire médiéval regroupe les dessins des espèces animales sur différents supports. Les représentations étaient éditées dans un contexte religieux, davantage que dans un but d'inventaire (Tesnières, 2005). L'imaginaire autour des animaux se retrouve au cours de l'histoire avec des représentations plus ou moins précises des espèces. Les cartes anciennes regorgent de dessins d'espèces animales réelles ou inventées. Au-delà de leur fonction décorative sur des territoires inexplorés ou des zones vides d'informations cartographiques, les animaux présentent un caractère symbolique des régions du monde, comme illustré en Figure I.1. À l'époque contemporaine, les animaux restent très présents dans la culture des hommes. La littérature ainsi que les divers domaines artistiques intègrent couramment la faune.

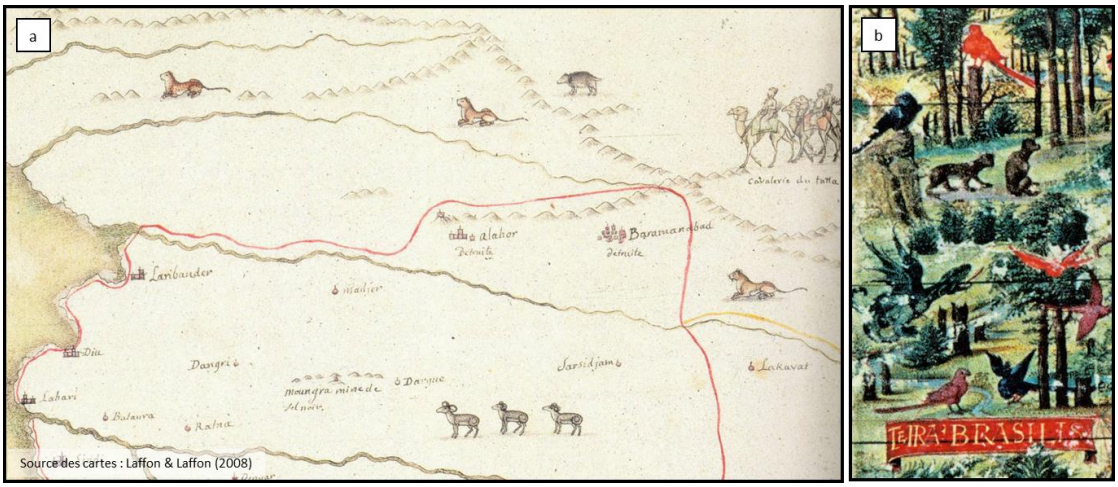


Figure I.1. Dessins d'animaux réels et imaginaires sur plusieurs cartes anciennes. Détails des cartes suivantes : a) « Carte de Tatta, province indienne sous l'empire Moghul » par le colonel Gentil, 1770, British Library, Londres, b) Carte de 1525 du Brésil par Reinel et Homem, BNF, Paris (Laffon & Laffon, 2008).

La faune uniquement sauvage à l'origine, a ensuite été divisée dans ses rapports à l'homme par la domestication qui s'est étalée à partir de -10 000 av. J.-C., sauf pour les chiens survenue auparavant (Germonpré *et al.*, 2012). La domestication a eu des effets réciproques (Digard,

1988). De nouvelles variétés d'espèces animales sont apparues par des processus de sélection. Les chiens répondent à présent à une multitude de variétés, aussi appelées races, issues de l'espèce commune *Canis Lupus*. Cette place des animaux à proximité des hommes a certainement contribué à l'intérêt des hommes envers la faune sauvage, par exemple dans les sociétés occidentales qui ont intégré au fil de l'histoire les animaux à leurs cultures et à leurs religions (Catsaras, 1999). Les animaux ont à leur tour transformé le mode de vie des hommes. L'élevage a assuré historiquement une ressource stable constituant de la nourriture, facilitant les travaux agricoles, assurant un moyen de transport. La chasse, qui fournissait autrefois une ressource centrale pour la survie, a évolué vers la pratique d'une activité de loisir. La chasse fait partie aujourd'hui d'un débat sur sa justification et son éthique. Elle peut être vue comme une communion avec la nature dans un affrontement entre l'homme et l'animal, ou au contraire comme une pratique désuète (Baticle, 2012 ; Boussin, 2006). D'un point de vue environnemental, elle est à présent associée à la gestion du gibier via des plans de chasse chiffrant des objectifs de prélèvements par espèce.

Au-delà des ressources que représentent les animaux, l'engouement pour les espèces est variable dans le temps (Baratay, 2011), comme l'illustre récemment le cas des nouveaux animaux de compagnie (NAC). Le cheval également est un bon exemple de ces évolutions. D'abord essentiel pour les transports de personnes ou de biens, il a également été consommé pour à présent être principalement considéré comme un animal de compagnie (Digard, 2012). Toutefois, un contexte de crise économique peut amener à un retour vers l'abattage et la consommation comme l'illustre le récent cas de vente massive de viande de cheval de Roumanie suite à leur interdiction de circulation sur réseau routier, et le cas de la vente de chevaux anglais[2]. L'industrialisation au XIXème siècle accompagnée d'une urbanisation croissante a contribué dans les pays occidentaux à l'éloignement entre les hommes et les animaux et plus généralement avec la nature. Les modes de vie, évoluant avec l'occupation de l'espace par les hommes, ont une influence sur la présence de la faune sauvage et domestique. Par exemple, les changements des pratiques agricoles et d'élevage en France au XXème siècle développées majoritairement en l'absence de grands prédateurs comme le loup, génèrent des problématiques suite à leur recolonisation de certains territoires (Benhamou, 2007). Selon l'espace de vie, les interactions et les points de vue diffèrent. Les citadins sont par exemple au contact d'espèces animales particulières qui ont su s'adapter au milieu urbain. Leurs contacts diffèrent par exemple selon les situations socio-économiques et les conditions de logement (Blanc, 2000).

Les animaux représentent des ressources d'alimentation, de compagnie, d'aide aux travaux agricoles et aux transports. Les animaux sont également des éléments perturbateurs et parfois de conflit lorsqu'ils abîment ou empiètent sur l'espace de vie des hommes. La diversité des relations entre l'homme et l'animal s'étend des fonctions utilitaires amenant une proximité spatiale, à une attitude de méfiance ou de peur vis-à-vis de certaines espèces. Les points de vue des sociétés sur la faune ont évolué au cours de l'histoire. La nature peut être considérée selon un point de vue bipartite : comme une ressource en particulier nourricière et comme un danger pour l'homme. Les dangers que représentent les animaux peuvent résulter d'attaques directes ou de la transmission de maladies. Les animaux peuvent détruire des récoltes à l'image des criquets, des rongeurs ou des éléphants (Aggarwal *et al.*, 2006). Les menaces de la nature sur l'homme laissent à présent de plus en plus la place aux menaces de l'homme sur la nature et par corollaire sur les animaux. Les rapports s'en retrouvent inversés, même s'ils continuent d'exister dans les deux sens. La nécessité d'une protection de la nature, apparue depuis plusieurs siècles

[2] Source : [http://agriculture.gouv.fr/]

(Veyret & Simon, 2006), s'est renforcée avec les problématiques liées à l'accroissement démographique et à l'intensification des activités humaines (Rodary *et al.*, 2003). Dès les années 1960, R. Carson alertait par exemple dans son essai *Le Printemps Silencieux* (1962) sur les effets négatifs des nouvelles pratiques agricoles sur les animaux, comme l'utilisation excessive des pesticides.

Connaissances et positionnement par rapport à la faune

Les hommes se sont intéressés aux animaux suivant une démarche de découverte. Connaître le vivant s'est inscrit dans les disciplines scientifiques avec notamment les travaux des naturalistes. La démarche a d'abord été de découvrir les espèces animales dans leur diversité, puis de les lister, de les décrire et de les classer par différentes approches (Micoud, 2010). Des classifications des espèces végétales et animales ont été proposées, par exemple la classification de Carl Von Linné. La description organisée des animaux représente un enjeu de définition des termes des rangs taxonomiques. Cet enjeu est lié aux interrogations sur le fonctionnement du monde vivant ainsi que sur son évolution. Les voyages lors de la période des Grandes Découvertes ont amené à la connaissance de nouvelles espèces. Les réflexions ont enrichi les théories sur l'évolution du monde vivant dont celle de Charles Darwin. La découverte et les classifications du vivant demeurent toujours parmi les objectifs des scientifiques, notamment dans la définition de la nomenclature des espèces (Le Guyader, 2002). La compréhension des comportements des animaux constitue également un sujet d'étude : décrire les comportements et les interactions inter et intra-spécifiques. Certaines capacités des animaux continuent de soulever des questions : instinct, capteurs sensoriels, communication et transmission de connaissances entre animaux. Les capacités physiques de déplacement sont par ailleurs source d'inspiration et d'interrogation : selon les espèces, capacité de se déplacer dans l'eau, dans les airs, sous ou sur la terre.

Les enjeux de connaissance scientifique sur la faune et la nature se traduisent par l'existence de plusieurs organismes spécialisés. Peuvent par exemple être cités le MNHN (Muséum national d'Histoire naturelle), l'ONF (Office National des Forêts), l'ONCFS (Office National de la Chasse et de la Faune Sauvage) et certains départements de l'INRA (Institut national de la recherche agronomique). Ces établissements listés non exhaustivement sont en charge de :

- connaître : par la mise en place d'inventaires et d'études ;
- comprendre : des suivis sont réalisés en laboratoire ou en milieu naturel dans des domaines différents (biologie, éthologie) ;
- gérer les ressources : en étudiant et en organisant leur exploitation.

Les politiques publiques s'appuient sur les suivis réalisés par les instituts d'étude et de recherche pour la définition et l'application des mesures de gestion de l'environnement.

Par ailleurs, l'intérêt de la société pour le monde vivant s'est traduit entre autres par la création de lieux ouverts au public et réunissant plusieurs espèces végétales ou animales. Il en est ainsi de la mise en place de jardins botaniques dès le XVIème siècle (Allain, 2012). Les cirques et les ménageries regroupant plusieurs espèces animales plus ou moins considérées comme exotiques ont ensuite été complétés par des parcs zoologiques (Baratay & Hardouin-Fugier, 1998). Ces parcs ont été mis en place pour l'étude scientifique des espèces et leur observation par le grand public, comme le parc de Londres ouvert en 1828, le premier à répondre à l'appellation de zoo. Des enjeux de préservation sont aujourd'hui associés à ces parcs. De nombreux ouvrages et documentaires animaliers rencontrent la curiosité du public. Les naturalistes dits amateurs s'intéressent à l'observation de la nature (Noël, 2007). Ils alimentent à présent de leurs

observations des atlas en ligne. Ces amateurs contribuent à des démarches d'inventaire et des études sur la répartition des espèces, comme illustré par le portail Web en Figure I.2.

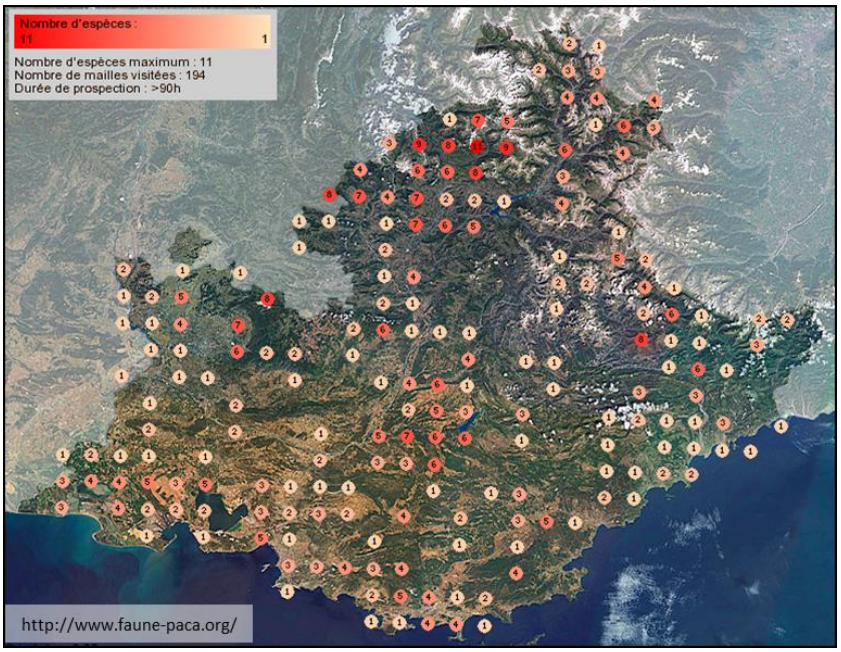


Figure I.2. Carte collaborative de présence des mammifères correspondant aux nombres d'observations d'espèces différentes par maille sur une grille régulière (Source : [http://www.faune-paca.org/]).

Les observations sur la nature s'accompagnent d'une prise de conscience sur la nécessité de la préserver. Cette prise de conscience concerne d'abord l'environnement proche dans lequel les hommes vivent et dont ils retirent des profits. Au niveau national, les constats sur les évolutions du nombre et de la répartition des espèces animales mettent en lumière les pressions anthropiques. Certaines zones du globe n'ont pas encore été inventoriées de manière exhaustive et des espèces disparaissent avant d'être découvertes (Chevassus-au-Louis, 2006). La gestion d'un patrimoine naturel appartenant à l'humanité reste délicate quant à sa définition et à son type de gestion (Aubertin *et al.*, 1998). Sgard (2010) considère que le paysage[3], la flore et la faune sont trois entités fondant le patrimoine naturel et qu'ils font partie, de ce fait, d'un bien commun. Cependant, ces trois entités sont influencées par les hommes. Les paysages ont largement été construits par les sociétés, y compris des paysages que les populations urbaines peuvent percevoir comme « naturels ». Par exemple les alpages montagnards ont été gagnés sur la forêt par les sociétés montagnardes (Veron, 1989). Le cadre légal reste par ailleurs à définir sur le statut des espèces végétales et animales (Micoud & Bobbé, 2006). La « confusion des chiffres » de la biodiversité mise en avant par Arnould (2006) entretient l'ambigüité des priorités environnementales. Les problématiques concernant les espèces animales, leur connaissance et leur gestion dépendent de la partie du monde concernée. Les hommes vivent plus ou moins à proximité de la faune, elle-même plus ou moins présente selon les milieux de vie. Les interactions entre homme et faune dépendent ainsi de l'espace considéré.

La coexistence entre les hommes et les animaux

Les hommes et la faune évoluent dans un même espace. Des interactions en découlent obligatoirement. Nous avons vu que les interactions et les points de vue peuvent différer selon les espèces animales. La coexistence entre hommes et animaux sur un même espace varie aussi

[3] Nous reviendrons sur le terme de paysage dans la partie I-1.2

en fonction du type d'espace. Les liens entre les hommes, la faune et l'espace sont complexes, faisant des animaux un objet d'étude particulier en géographie. Les espaces de vie dans le monde peuvent être caractérisés de plusieurs façons, notamment selon leur degré d'anthropisation. En France, coexistent des zones urbaines plus ou moins denses, des zones rurales, des zones naturelles sous influence d'activités humaines, des zones sauvages sans présence permanente d'hommes. Les espaces de vie pour les hommes sont souvent répartis entre les zones urbaines et les zones rurales. Pour les animaux, les espaces de vie se définissent davantage en fonction du type de milieu ou d'habitat[4] : par exemple urbain et périurbain, forestier, littoral, prairial. Ces milieux sont caractérisés par une présence humaine plus ou moins forte et sont plus ou moins sous l'influence d'activités anthropiques. D'après l'INSEE, les surfaces artificialisées[5] représentaient environ 9 % du territoire français en 2010 et la population vivant dans une grande aire urbaine plus de 82 % de la population totale. Un grand nombre d'habitants ont des contacts restreints avec la faune sauvage, les animaux d'élevage ou des animaux domestiques. En zone rurale, les points de vue sur les animaux sont différents de par leur proximité plus grande avec les hommes, sans être pour autant toujours favorables (Blanc, 2000 ; Larrère & Larrère, 1997). Les points de vue sur les animaux ont évolué au cours de l'histoire, et ils changent selon les espaces considérés. Les activités humaines qui sont liées à ces espaces contribuent à des interactions différentes. Par exemple, le chien peut être vu uniquement comme animal de compagnie, et dans d'autres modes de vie comme animal de garde ou de protection des troupeaux. Les espèces sauvages sont par ailleurs réparties selon les types d'habitat. Les comportements et les besoins des animaux varient et entrent plus ou moins en interaction avec les hommes. Les espaces urbanisés freinent par exemple la présence d'espèces sauvages qui n'y trouvent pas les lieux de vie et les ressources nécessaires. La Figure I.3 montre plusieurs espaces correspondant à des occupations du sol différentes, pouvant répondre plus ou moins aux exigences des espèces animales. L'adaptation de l'habitat pour les espèces conditionne la présence de celles-ci.

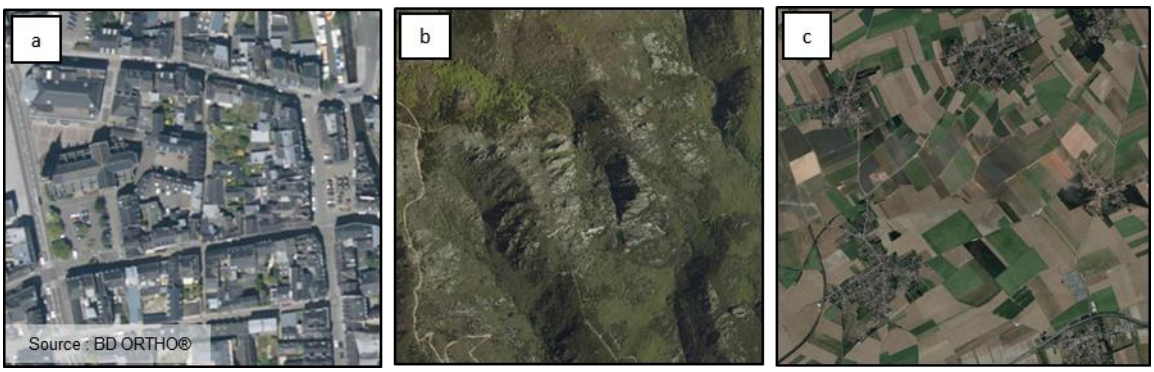


Figure I.3. Différentes occupations du sol correspondant à des habitats plus ou moins adaptés selon les espèces animales : a) bâti et sols artificialisés dans un centre-ville, b) zone de moyenne montagne, c) cultures agricoles et bâti peu dense.

Certaines régions du monde sont très anthropisées, d'autres ne sont ni occupées ni exploitées, voire sont protégées par des politiques publiques. Les différences sont présentes à l'échelle des

[4] Milieu : le terme peut être défini comme la nature générale d'un environnement : terrestre, aquatique, humide (Lacoste & Salanon, 1999).
Habitat : ensemble de facteurs représentant un lieu de vie adapté pour les espèces (Lacoste & Salanon, 1999).

[5] Selon l'INSEE, les surfaces artificialisées regroupent : « les zones urbanisées (tissu urbain continu ou discontinu), les zones industrielles et commerciales, les réseaux de transport, les mines, carrières, décharges et chantiers, ainsi que les espaces verts artificialisés (espaces verts urbains, équipements sportifs et de loisirs) ».

continents ou des pays. L'Asie et l'Europe sont les deux continents les plus densément peuplés, ce qui influence l'occupation du sol et la faible présence de grands espaces sauvages représentant des milieux a priori favorables pour les espèces. À l'échelle des pays, la répartition entre milieux naturels et milieux anthropisés est associée à la superficie du pays et aux modes de vie des populations humaines. Par exemple, la France et le Brésil ont un taux d'urbanisation de la population équivalent mais la densité de population au Brésil est cinq fois moins importante (d'après les chiffres publiés par l'INED en 2011).

L'homme façonne les paysages, ce qui peut générer des perturbations dans les habitats naturels et chez les animaux eux-mêmes. Les problématiques de gestion de la faune sauvage correspondent aux caractéristiques de l'espace occupé par l'homme. L'homme agit directement sur la disparition, l'introduction ou la réintroduction d'espèces sur une zone. La présence de la faune sauvage peut déranger (exemple des modes d'élevage non adapté à la présence du loup en France) ou peut être requise pour conserver un mode de vie (exemple de l'introduction des renards en Australie entre autres pour conserver la chasse à courre et pour tenter de diminuer la population de lapins également introduits). La présence de certaines espèces est acceptée dans un espace à certaines conditions, illustrant les possibles contradictions entre les envies de préservation et les compromis nécessaires (Bobbé, 2000). Si la présence de certaines espèces est influencée par l'homme, les animaux influencent également l'homme, sur des aspects culturels et sur des aspects de nécessité au maintien des modes de vie. Le paragraphe suivant aborde l'intérêt pour les études et les mesures de préservation de la faune.

1.1.2. La participation de la faune à la structure et au fonctionnement des écosystèmes

Les études des écosystèmes et les problématiques de la conservation des espèces

La protection des espèces animales s'inscrit dans la préservation de la biodiversité. Ce terme apparu en 1992 à la conférence de Rio indique que l'enjeu est non seulement dans le nombre d'individus présents au sein d'une espèce mais aussi dans le nombre d'espèces différentes. Les espèces animales et végétales sont par ailleurs liées entre elles par des relations d'interdépendance le long d'une chaîne trophique plus ou moins longue. Ces relations se retrouvent dans la notion d'écosystème : les êtres vivants forment un système dans lequel chaque entité joue un rôle. Les approches de préservation des espèces animales s'inscrivent à présent sous cet angle (Veyet & Simon, 2006). La disparition d'une espèce animale peut en effet entraîner la disparition d'autres espèces mais aussi d'un service utile à la société. Une appellation consacrée est à présent celle de service écosystémique, c'est-à-dire les services que les écosystèmes sont susceptibles de fournir à la société (Alcamo & Bennett, 2003). Ils concernent des domaines variés et font appel aux différentes composantes des écosystèmes : végétation, faune et variables environnementales. Le tourisme est un service par la curiosité de visiteurs à l'observation d'espèces ou par les loisirs de plein air. La production de ressources représente aussi un service, comme la production de miel par les abeilles. D'autres actions sont essentielles telles que la pollinisation des fleurs par les insectes et plus généralement la zoochorie[6], la première étant actuellement considéré comme un service écosystémique important pour l'agriculture. Ces services sont irréalisables ou alors beaucoup plus coûteux sans intervention de la faune. Des mesures de préservation des espèces sont bénéfiques pour les écosystèmes ainsi que pour les hommes.

[6] Dispersion des graines de végétaux par les animaux, par exemple via les poils ou l'ingestion.

Les mesures de gestion durable des ressources sont anciennes à l'image de la gestion des forêts (Neyroumande & Vallauri, 2011) ou de la gestion du gibier pour et par la chasse. Les mesures de protection de la nature ont suivi. Parmi celles-ci, il est possible de citer la mise en place de parcs naturels dans une vision de protection de la nature vis-à-vis des actions humaines. Le premier parc – Parc national de Yellowstone – a été créé aux États-Unis en 1872. Les approches de protection tentent à présent d'intégrer davantage la société et les activités humaines. L'imperméabilité des zones protégées aux activités humaines n'est plus vue comme une condition obligatoire d'efficacité dans la préservation des milieux naturels. Les préoccupations de préservation ne sont d'ailleurs plus limitées aux espèces ou aux paysages remarquables. Elles s'élargissent à l'ensemble des espèces, communes ou non, dans une optique écosystémique. Des compromis sont recherchés entre la protection et l'exploitation des processus écologiques. Rodary *et al.* (2003) rappellent notamment les difficultés dans l'intégration réciproque de ces deux démarches.

La défense de causes emblématiques a permis une prise de conscience sur la nécessité de préserver la faune. Les actions de protection sont menées par la société civile et par les institutions officielles en essayant de correspondre aux attentes et aux besoins de la société (Guillet, 2011). Plusieurs risques d'extinction d'espèces ont amené à des actions à des niveaux régionaux voire internationaux. Par exemple la réduction de la population de chamois et de bouquetins autochtones dans les Alpes a motivé la création de parcs nationaux en France, le premier étant celui de la Vanoise en 1963 (Préau, 1964). La disparition des baleines crainte dans la deuxième moitié du XXème siècle, a conduit à un moratoire international sur la chasse commerciale en 1982. D'autres conventions internationales ont été signées telles la Convention de Berne en 1979 sur la protection des espèces et des milieux en Europe. Des suivis d'espèces animales sont effectués par des organismes nationaux et internationaux, parmi lesquels l'UICN (Union internationale pour la conservation de la nature). Une de ses missions consiste à mener des inventaires successifs des espèces végétales et animales afin d'évaluer les risques de disparition. Des catégories ont été définies pour qualifier l'état de conservation des espèces, de « préoccupation mineure » à « éteinte » en passant par des seuils de vulnérabilité. L'UICN a établi qu'une espèce de mammifères sur quatre était menacée d'extinction (UICN & MNHN, 2009). Des espèces emblématiques sont souvent mises en avant par les organisations de défense de la nature afin de mener des campagnes de sensibilisation et des actions de préservation : panda, baleine mais aussi hérisson, chauve-souris. L'objectif est le soutien de l'opinion publique. Cependant d'autres enjeux de développement économique se trouvent en opposition avec la sauvegarde des espèces animales. L'orang-outan est un symbole du dilemme entre la préservation d'un habitat indispensable à l'espèce et l'utilisation des terres pour les besoins de l'homme. Dans ce cas, la diminution des forêts tropicales sont le résultat d'échecs de politiques agricoles entrainant des cultures sur brûlis bénéfiques qu'à court terme et des grandes monocultures de palmeraies (Louchart, 2011). L'exemple de la déforestation au profit de terres agricoles ou d'une exploitation du sous-sol montre que les actions de protection sont confrontées à des démarches opposées par la société humaine (Blanc-Pamard *et al.*, 2005 ; Tsayem Demaze, 2007 ; Arnould & Simon, 2007). Les enjeux de préservation de la nature et en particulier de la faune ne sont pas les mêmes selon les régions du monde. Les points chauds ou « hotspots » de la biodiversité sont essentiellement situés dans des pays en développement (Rodary *et al.*, 2003). Ces pays réunissent souvent des espèces emblématiques, symboles de la sensibilisation à la protection de la nature, alors que les priorités sont souvent d'abord le développement et l'amélioration des conditions de vie des populations humaines. Les compromis sont alors nécessaires pour préserver les milieux aux dépens de l'exploitation de richesses économiques (Karsenty, 2010). Le maintien de la biodiversité apparaît à présent

comme une cause mondiale mais sa perception et les moyens mis en œuvre diffèrent selon les pays, notamment entre le Nord et le Sud (Cohen, 2012).

Un autre aspect de la problématique de conservation est celui des conflits entre homme et animaux. Le terme de conflit est repris dans la littérature pour désigner des situations où l'homme est en opposition soit directe avec les animaux soit indirecte via une tierce ressource (Binot *et al.*, 2006 ; Marchand, 2012 [b]). Selon les zones géographiques, les conflits entre les hommes et la faune sauvage sont plus ou moins nombreux. En France, la majorité de la population n'est plus guère soumise à une exposition dangereuse à la présence d'animaux. Les espèces occupant le territoire et présentant un danger mortel sont relativement rares en comparaison avec le nombre d'espèces existantes. Les grands prédateurs, qui sont au centre de polémiques quant à leur réintroduction ou à leur colonisation, provoquent plus de crainte pour le bétail qu'une peur d'attaque sur des personnes (Schwartz *et al.*, 2003). Les populations humaines vulnérables sont celles vivant dans des zones à fortes présence d'animaux potentiellement dangereux pour l'homme et celles ayant un mode de vie plus exposé, par exemple en milieu rural, ou à proximité de forêts et d'habitats propices aux espèces, comme des zones protégées ou alors en déprise. Les conflits perdent en importance en raison de la diminution de la densité d'animaux dans les zones fortement occupées par les hommes. Les modes de vie des hommes changent également par la progression d'une installation en zones urbaines et périurbaines. Certaines espèces même emblématiques peuvent être mal reçues par les populations locales. Par exemple, les mesures de protection gouvernementales peuvent être perçues comme une restriction à se défendre pour les habitants, par exemple pour le cas du tigre en Inde (Guillerme *et al.*, 2009). Pourtant, le tourisme généré par cette espèce a des retombées économiques pour certains groupes sociaux. La perception des dangers que représentent les animaux par les populations peut aussi être éloignée de la réalité. Marchand (2012 [b]) s'intéresse aux conflits entre hommes et faune sauvage dans la forêt amazonienne. Il revient sur les espèces concernées à partir du point de vue des habitants sur les dégâts ou les dangers que représentent les animaux sur les personnes et les activités agricoles et piscicoles. Le nombre de dégâts provoqués par les espèces n'est pas toujours corrélé avec la perception par les habitants et les mesures prises pour empêcher ces dégâts. De même les mammifères marins peuvent être associés à un impact négatif sur les populations de poissons, imprimant une vision de compétition avec les activités de pêche (Kaschner, 2004). En France, cette situation se retrouve pour certaines espèces dont la tolérance varie selon les zones. Le prélèvement par les loups sur la population d'ongulés sauvages ne contribue a priori pas une cause de déclin de cette dernière (Espuno, 2004). Les prédateurs peuvent au contraire avoir une action positive de régulation sur les populations d'ongulés sauvages qui exercent eux-mêmes une pression sur les ressources végétales. En revanche, le prélèvement par ces prédateurs d'animaux d'élevage pose un problème, car il fragilise une activité économique en limite de rentabilité (agriculture et élevage de montagne) et remet en jeu, à moyen et long termes, la conservation des paysages qui lui est associée. La problématique de l'équilibre des écosystèmes est bien au cœur des enjeux de conservation des espèces animales.

Les mesures de protection des espèces animales sont souvent portées par des cas particuliers dont l'évolution des populations est connue. La situation de la plupart des espèces est seulement estimée et les connaissances sur leur comportement et leur interaction avec leur environnement demeurent partielles. Les difficultés de suivi des animaux tiennent en partie à leur mobilité et au caractère aléatoire de cette dernière. Les études sur la faune et leur déplacement sont d'autant plus importantes qu'elles contribuent à comprendre le fonctionnement des écosystèmes occupés et modifiés par l'homme.

Intérêt des études de déplacements

La mobilité des animaux est une composante importante de leur utilité pour la société. Cette capacité les rend également moins prévisibles et moins contrôlables, selon les espèces et selon l'espace. Ils peuvent devenir source de conflits, du fait des dégâts potentiellement ou réellement causés par l'exploitation d'un espace et de ses ressources partagés avec l'homme. Des études restent pourtant nécessaires pour enrichir les connaissances sur les comportements des espèces et en particulier sur leurs déplacements. Ces connaissances représentent un aspect essentiel dans l'évaluation des relations existantes entre les animaux et leur environnement. Elles sont d'autant plus importantes que les changements environnementaux, que ce soit paysagers ou climatiques, existent et impliquent la société. La préservation des écosystèmes nécessite alors des mesures en faveur des espaces de vie des espèces et de leurs déplacements.

Une caractéristique de l'animal est sa capacité à se déplacer. Cette aptitude est hétérogène selon les espèces, certaines espèces se déplaçant sur de petits trajets alors que d'autres évoluent dans de grands espaces. Les moyens physiques et les milieux de déplacements diffèrent également : aquatique, aérien, terrestre, souterrain. Il n'est donc pas évident de localiser les animaux dans un espace : déterminer l'aire de répartition de l'espèce, le domaine vital[7] d'un animal ou d'un troupeau, les trajets linéaires de déplacement. À ceci s'ajoute la potentialité du déplacement : la part d'aléatoire est fondamentale. Les capacités de mobilité et d'adaptation comportementale font de l'animal un objet d'étude complexe. Les animaux restent délicats à étudier car ils appellent à une formation préalable en écologie. De plus, ils ne constituent pas un élément du paysage facilement cartographiable (Blanc & Cohen, 2002). Les études sur la mobilité des animaux ont des points communs avec celles sur la mobilité humaine. En écologie qui est le domaine d'étude principal de la faune, les suivis des animaux sont moins fréquents que ceux de la végétation malgré un nombre d'espèces supérieur (Lacoste & Salanon, 1999). Néanmoins les études sur les comportements des animaux intègrent souvent la composante spatiale : que ce soit pour la notion de territoire, de domaine vital, d'habitat, de ressources (Wynne-Edwards, 1962). La mobilité des animaux est un point essentiel dans le rôle qu'ils jouent sur l'environnement et sur la société, et ainsi dans les études qui leur sont consacrées. L'approche des études de déplacements est fonction des espèces, du type des déplacements et des caractéristiques de l'espace concerné. Selon les espèces, les capacités de déplacements entraînent les animaux sur des distances plus ou moins grandes. Les besoins des espèces en ressources sont une des motivations de leur mobilité, ainsi que la recherche d'un partenaire ou encore d'un nouveau lieu de vie. Les déplacements peuvent être de fréquence annuelle pour les espèces migratrices. Les migrations des grands herbivores en Afrique, en Europe et en Amérique du nord sont des déplacements correspondant à des changements phénologiques et à une recherche d'un milieu favorable en ressources. Les études doivent être adaptées aux espèces suivies, aux individus et aux caractéristiques de leurs déplacements. Nous y reviendrons dans la partie I-2.1.

Les études sur les déplacements de la faune représentent un enjeu fort dans la préservation de l'équilibre des écosystèmes. La possibilité de déplacements des animaux est un aspect de la préservation de la biodiversité. Les freins aux déplacements des animaux empêchent la poursuite de mécanismes nécessaires à une survie individuelle et au maintien de l'espèce.

[7] Le domaine de vie ou domaine vital est l'emprise de la zone occupée par un animal au cours de sa vie ou d'une période de sa vie. Nous reviendrons sur ce concept plusieurs fois au cours du mémoire.

L'intérêt d'une étude des déplacements des animaux est aujourd'hui accru par plusieurs tendances évolutives de l'environnement dans lequel évoluent les animaux :

- L'augmentation du nombre d'obstacles aux déplacements.

Cet aspect est lié à la notion de fragmentation de l'espace. Les types d'occupations du sol constituant des habitats pour la faune occupent des surfaces moindres, éloignées ou soumises à une séparation par des obstacles. Cela a pour conséquence la diminution des milieux de vie ainsi que des possibilités de déplacements entre ces espaces.

- L'urbanisation de l'espace et l'artificialisation des sols.

La régression des milieux dits naturels qui constituent les zones de vie de la plupart des espèces animales peut entraîner une baisse du nombre d'animaux et du nombre d'espèces. Cette conséquence est particulièrement valable pour les espèces à faible marge d'adaptation, alors que d'autres sont capables de trouver des habitats de substitution (Pellissier *et al.*, 2012).

- Les modifications environnementales dont le changement climatique.

Les changements induits par les modifications des milieux de vie des animaux les poussent à s'adapter ou se déplacer. À l'instar de l'homme se déplaçant suite à des modifications de climat et surtout suite à leurs conséquences, les animaux peuvent migrer. Ils trouvent de nouveaux milieux plus adaptés, en se déplaçant en latitude ou en altitude (Dugdale *et al.*, 2009). Les changements environnementaux semblent plus rapides que les types de changements précédents, ce qui demande une adaptation accrue des espèces (Chen *et al.*, 2011 ; Hoff & Rambal, 2000).

Les connaissances sur les espèces animales, leurs comportements et en particulier leur déplacement s'appuient sur des observations et des suivis. De nombreuses études existent sur les animaux. Le paragraphe suivant résume les relations entre déplacements de faune et paysage à l'aide de plusieurs exemples présents dans la littérature.

1.2. L'influence du paysage sur la faune et ses déplacements

1.2.1. Les notions d'espace, de paysage et d'éléments du paysage

Dans la compréhension de l'influence de l'espace sur les déplacements, le concept même d'« espace » fait l'objet de définitions et d'analyses diverses. L'autre terme associé et que nous employons largement est celui de « paysage ». L'objet de ce paragraphe n'est pas de revenir sur l'ensemble des définitions concernant le vocabulaire, mais nous souhaitons indiquer dans quel sens nous les utilisons dans ce mémoire.

L'espace peut être défini comme une étendue, d'après le dictionnaire Larousse, ou encore comme une « portion définie de la surface terrestre » (Brunet *et al.*, 2005). Cet énoncé reste général. Il met cependant en évidence la notion de localisation, localisation d'une étendue terrestre considérée et localisation dans le référentiel que représente cette étendue. L'espace est un concept clé en géographie car « l'espace géographique est l'objet central de la géographie » (Lévy & Lussault, 2003). Luginbühl (2007) rappelle que la géographie physique a eu tendance à laisser de côté les considérations sociétales, alors qu'en géographie humaine, le paysage peut être considéré comme l'interface entre la société et la nature comme par Bertrand (1968). Le paysage possède par ailleurs son fonctionnement actuel et sa propre histoire. Il s'agit de le décrire et de l'interpréter par des clés de lecture en sciences forestières, agronomiques et ethnologiques (Lizet & de Ravignac, 1987). De l'autre, l'emploi du mot est souvent associé à un point de vue sociétal : les pratiques des hommes et l'organisation des sociétés s'inscrivent dans l'espace physique. L'espace est soumis aux utilisations qu'en font les hommes et à des

aménagements concrets (Lévy & Lussault, 2003). Sous cet angle, il se rapproche du concept de « territoire ». D'après Di Méo (1998), le territoire « témoigne d'une appropriation à la fois économique, idéologique et politique (sociale donc) de l'espace ». Moine (2005) présente le territoire comme ayant « une double nature, à la fois matérielle et il s'agit de faire référence alors à l'espace géographique, sous-système du territoire, et symbolique ou idéelle, en relation cette fois avec les systèmes de représentation qui guident les sociétés dans l'appréhension qu'elles ont de leur *environnement* ». Espace et territoire, deux termes clé dans les études en géographie demeurent polysémiques. Par la suite, nous nous limitons aux aspects matériels, sans prendre en compte l'espace des informations et des communications. Nous employons le mot espace dans le sens descriptif de l'environnement physique et le terme territoire pour insister sur les relations société-environnement physique. Selon le contexte, le terme territoire est aussi attribué à l'espace dans lequel vivent les animaux solitaires ou en groupe qui en défendent l'entrée à des intrus (Robardet, 2007). En parallèle de l'espace, le paysage prend en compte un environnement. Cette notion est utilisée dans plusieurs domaines. Le paysage peut être une portion d'espace telle qu'elle est perçue par un observateur, d'après Lévy & Lussault (2003). Il s'étudie alors dans un contexte particulier, celui du point de vue de l'observateur, ainsi que celui capté à un moment précis. Cet aspect est développé par Sgard (2010) lorsqu'elle considère la valeur patrimoniale du paysage avec une « conception du paysage fondée sur la relation que les individus et les groupes construisent avec le territoire, […] relation entre le matériel et le symbolique, entre le physique et le phénoménal pour reprendre ses mots. Le paysage est conçu comme la dimension sensible, esthétique et affective de cette relation, contribuant au sentiment d'appartenance voire à l'identité territoriale […] ». Le paysage intègre la perception des hommes.

Dans Burel et Baudry (1999), le paysage est défini comme un « niveau d'organisation des systèmes écologiques, supérieur à l'écosystème ; il se caractérise essentiellement par son hétérogénéité et par sa dynamique gouvernée pour partie par les activités humaines. Il existe indépendamment de la perception ». Le paysage est un objet d'étude existant même en dehors d'un point de vue subjectif, mais qui reste soumis aux définitions. Dans l'Encyclopaedia Universalis (1999), il est rappelé que la définition du paysage de Forman & Godron (1986) ne fait « aucune référence aux phénomènes perceptifs […] [et qu'elle] considère exclusivement des espaces caractérisés par des dimensions d'un ordre de grandeur déterminé et une certaine diversité d'écosystème ». Il n'est pas évident de déterminer les contours d'une définition du paysage commune entre les disciplines et entre les auteurs. Notre emploi du terme paysage se limite à un travail descriptif de l'état actuel et de l'historique. Les notions de points de vue et de subjectivité seront mentionnées comme telles si elles interviennent dans nos descriptions et analyses à venir. Les définitions utilisées pour l'espace et le paysage sont donc relativement proches, en restant relativement neutre sur la description des environnements physiques. Nous utilisons le terme d'espace de manière générique, et le terme de paysage afin de mettre en avant les différentes composantes visibles de l'espace et leur configuration.
Le paysage est constitué par des éléments du paysage, pouvant aussi être appelés composantes. Nous reprenons le terme « élément du paysage » qui peut être confondu avec les « éléments » de la citation de Bertrand (1968) dans Richard (1973) : « Le paysage [est] le résultat de la combinaison dynamique, donc instable, d'éléments physiques, biologiques et anthropiques qui en réagissant dialectiquement les uns sur les autres font du paysage un ensemble unique et indissociable en perpétuelle évolution ». Un élément peut par exemple correspondre à une route, à une habitation, à une forêt. Il peut aussi s'agir d'entités plus agrégées comme un ensemble de champs agricoles ou une association d'infrastructures de transport. Nous utilisons largement l'expression élément du paysage par la suite dans ces désignations plus ou moins

agrégées. Ces éléments sont intéressants pour aborder l'analyse des paysages. D'après Richard (1973), ils peuvent être « pris un par un pour mieux le décrire [le paysage], le classer et l'expliquer ».

Même si les paysages sont considérés sans prendre en compte la notion de perception par l'homme, ils ont été façonnés par l'homme par des actions plus ou moins conséquentes. Parmi les paysages à caractère naturel, citons par exemple les milieux humides, les paysages forestiers ou prairiaux. Les formes d'occupation humaine ont modifié les milieux naturels, directement ou par l'exploitation des ressources. Les paysages peuvent par ailleurs être catégorisés le long d'un gradient d'urbanisation, ou d'un degré d'artificialisation. Toutefois, les paysages très artificialisés que sont les villes, sont reconnus aujourd'hui comme des milieux de vie à part entière pour certaines espèces. Non seulement, les relations entre les hommes et les animaux ont évolué mais certains espèces se sont adaptées dans ou à proximité des villes.

Plusieurs études démontrent les relations entre le paysage et les déplacements de faune. Le paysage peut influer sur les déplacements, en faveur de la faune ou au contraire à son détriment en termes de présence et de déplacement. Nous présentons dans un premier temps les effets de la composition et de la configuration des paysages sur les déplacements de la faune (en I-1.2.2). Puis nous nous attachons aux relations entre les déplacements et une sélection d'éléments particuliers du paysage telles les routes et l'hydrographie (I-1.2.3), avant de continuer sur les effets des changements paysagers (I-1.2.4).

1.2.2. Les relations entre composition et configuration des paysages et la faune

Nous avons vu que le paysage pouvait se définir à partir d'éléments physiques. Le paysage englobe généralement des surfaces relativement grandes, à l' « échelle du kilomètre » (Godron, 2010). Il est donc associé à plusieurs éléments. Ce qui importe est à la fois la composition et la configuration de ces éléments. Elles possèdent toutes deux une influence sur les déplacements de la faune.

L'importance relative des natures d'occupation du sol et de leur répartition dans l'espace dépend des espèces animales. La structure de certains éléments joue un rôle essentiel pour les déplacements d'animaux. Par exemple, le couvert végétal d'une zone peut être proportionnellement faible mais avec une configuration favorable à la présence de faune. C'est le cas des réseaux de haies qui représentent des structures linéaires facilitant la circulation des espèces, par exemple pour les petits carnivores (Pereboom, 2006). Des éléments de végétation ponctuels et linéaires sont importants pour la présence des animaux : bandes herbacées, alignements d'arbres ou arbres isolés peuvent représenter des lieux de vie et de ressources pour les oiseaux, les insectes ou encore les mammifères (Schulz & Vilain, 2008). Dans certains cas, la composition, entendue dans le sens de fréquence des types d'occupations du sol composant un paysage, peut jouer un rôle plus important que la configuration des éléments du paysage. Les espèces d'oiseaux étudiées par Bélisle *et al.* (2001), la paruline bleue (*Dendroica caerulescens*), la paruline couronnée (*Seiurus aurocapillus*) et la mésange à tête noire (*Poecile atricapillus*), montrent une préférence de déplacements sur des zones à fort couvert végétal. La répartition des objets influence par contre moins leurs directions.

La connectivité correspond à un paramètre topologique de lien entre deux éléments du paysage, c'est un des paramètres importants de la configuration du paysage. Des zones de végétation proches mais de petites surfaces ne seront pas forcément suffisantes pour renforcer la

connectivité entre deux forêts. Au sens fonctionnel, cette connectivité indique si ces éléments sont reliés ou non par les espèces animales lors de leurs déplacements, sans que ces éléments soient forcément contigus ou proches (Theobald, 2001). L'absence de connectivité structurelle ne bloque pas forcément les déplacements. Des animaux peuvent atteindre des taches d'habitat même si elles sont éloignées les unes des autres (Taylor, 2006). Cependant, la fragmentation du paysage et par conséquent de l'habitat des espèces animales est souvent associée à une baisse en qualité des habitats et à une connectivité faible. Elle comprend une réduction des surfaces naturelles, un éloignement entre elles ainsi que des obstacles rendant difficile leur liaison[8]. Nous nous intéressons à présent à deux exemples des relations évolutives entre occupation du sol et faune, celui des pratiques agricoles et celui de l'urbanisation.

L'intensification de l'agriculture a eu des effets sur la diminution et la banalisation des populations des oiseaux notamment en Europe (Donald *et al.*, 2006). Une des causes vient de l'utilisation de traitements visant à protéger les cultures mais supprimant les ressources de nourriture pour les oiseaux. Les changements des politiques agricoles et le besoin d'augmenter les rendements ont entraîné la création de parcelles plus grandes et plus homogènes ainsi que la suppression du bocage (Rovéra & Martin 1998 ; Burel & Baudry, 1995). Composition et configuration du paysage convergent car l'organisation spatiale et l'occupation du sol par des champs de cultures sont moins propices aux oiseaux. Pour les déplacements en particulier, plusieurs espèces utilisent des structures linéaires de végétation. Leur disparition a des effets sur les déplacements et l'utilisation de l'espace.

Les pressions exercées sur les espèces animales peuvent être directement provoquées par la présence de l'homme. Les constructions bâties et plus généralement les zones urbaines empiètent sur les milieux naturels occupés par la faune. L'étalement urbain entraîne en effet une perte en surfaces naturelles : perte des éléments naturels indispensables pour les animaux tels des lieux de protection ou des ressources alimentaires. Les zones urbaines sont généralement définies comme des agglomérations à concentration humaine importante (CERTU, 2006). Sans entrer dans les différentes définitions de l'urbain, l'urbanisation s'est intensifiée en Europe et dans le monde (Bolay *et al.*, 2000 ; Le Gléau *et al.*, 1997). Les zones urbaines correspondent à des caractères physiques particuliers. Les conditions de température et d'humidité sont modifiées par rapport aux milieux naturels d'origine (Quénol *et al.*, 2007). La structure des bâtiments, les matériaux de construction, le recouvrement des sols, peuvent former des îlots de chaleur (Cantat, 2004). Les corollaires aux agglomérations contribuent à ces conditions : concentration de la circulation automobile, de zones d'industrie, ou encore de la présence de climatiseurs (Hsieh *et al.*, 2011 ; Sarrat *et al.*, 2006).

Certaines espèces se sont adaptées aux zones urbaines. Celles-ci peuvent représenter un milieu de vie permanent. Elles peuvent aussi être le lieu d'excursions ponctuelles d'animaux à la recherche de nourriture ou d'occupation temporaire à une période du cycle de vie. Par exemple, certains oiseaux marins dépendant de la mer peuvent nicher dans les centres-villes et y trouvent leur alimentation (Le Guillou, 2009). Certaines espèces de papillons peuvent vivre en milieu urbain à condition d'une connectivité herbacée ou d'une bonne qualité des habitats (Bergerot, 2010). Des espèces proches d'un point de vue taxonomique peuvent avoir des réponses différentes en fonction de la morphologie du bâti. Le pigeon biset (*Columba livia domestica*) s'est spécialisé dans les milieux urbains par rapport à son taxon d'origine *Columba livia*. Les fouines (*Martes foina*) logent fréquemment dans les habitations ou dans les greniers, dans lesquels elles

[8] Nous reviendrons dans la partie I-2.2 sur les notions de connectivité et de fragmentation du paysage dans le domaine de l'écologie du paysage.

trouvent un habitat de substitution par rapport à leur habitat naturel. L'espèce voisine en France, la martre (*Martes martes*) vit au contraire presque exclusivement en milieu forestier et souffre des conséquences de la fragmentation de leur habitat (Mergey, 2007). Les espèces sont plus ou moins adaptables selon la composition des milieux habités. Par exemple dans Pellissier *et al.* (2012), plusieurs guildes d'oiseaux définies selon le régime alimentaire et le type de nid sont étudiées en milieu urbain : certaines guildes sont sensibles à la configuration des espaces verts alors que d'autres bénéficient de l'hétérogénéité du bâti.

Plus que le nombre d'animaux qui diminue le long d'un gradient allant de zone rurale à centre-ville, c'est le nombre d'espèces différentes qui baisse (McKinney, 2006). Certaines espèces, souvent déclarées comme exotiques, peuvent pourtant s'accommoder des modifications de température et des effets des îlots de chaleur (Shochat *et al.*, 2006 ; Blair, 1996). Les réflexions sur l'intégration des politiques de conservation dans les villes s'orientent vers des gestions durables – économie d'énergie, traitement des déchets – ainsi que des aménagements originaux : murs végétaux, terrasses et jardins de biodiversité, corridors de déplacement (Clergeau, 2007). Par exemple, la Petite Ceinture, nom de l'emplacement d'une ancienne voie ferrée désaffectée à Paris, permet la présence d'insectes et joue le rôle de corridor écologique favorable à la pollinisation, comme décrit dans Cohen *et al.* (2012). Dans ce même article, le réseau hydrographique est mentionné comme intéressant pour des actions de végétalisation car il favorise le transport de pollen des plantes hydrophiles.

Une autre conséquence de l'urbanisation est la fragmentation des habitats naturels. Le développement urbain entraîne non seulement de nouvelles constructions mais également la création de liaisons de transport. Des études sur plusieurs espèces illustrent le déclin des populations suite à cette fragmentation (De Wan *et al.*, 2009). Les espèces d'amphibiens sont en particulier touchées. Par exemple avec la couverture croissante de l'espace par les routes et la densification du trafic, les populations de tortues terrestres tendent à diminuer aux abords des grandes villes (Galois et Bonin, 1999).

1.2.3. Les relations entre éléments du paysage et déplacements

Nous abordons à présent les relations entre des éléments particuliers du paysage, notamment linéaires, et les déplacements des animaux. Ces éléments peuvent constituer des barrières ou des corridors de circulation. Les obstacles aux déplacements ont plusieurs conséquences. Les « barrières » aux déplacements quotidiens peuvent agir sur le choix des zones de vie des animaux, ce qui se répercute sur la viabilité d'une population sur le long terme en réduisant les flux de gènes (Marsh *et al.*, 2005). Les barrières qui ne sont pas hermétiques sont traversées par les animaux avec un coût : par une mortalité accrue et par une dépense d'énergie supplémentaire, par exemple lors du parcours de distances exceptionnelles ou lors de sauts (Forman & Godron, 1986).

Les infrastructures linéaires de transport

Les infrastructures linéaires de transport incluent les routes ainsi que les lignes de chemin de fer, le réseau hydrographique étant abordé dans la partie suivante. Nous nous concentrons sur les effets que ces infrastructures ont sur la faune et sur leurs déplacements. Elles peuvent représenter des barrières mais également des corridors de déplacement. La littérature est en particulier riche sur les études des effets du réseau routier qui couvre largement certains territoires. Nous mentionnons les effets des routes ainsi que ceux induits par les voies ferrées, et nous présentons les résultats de quelques études.

- Les différents effets des infrastructures de transport

Les effets des infrastructures de transport sont liés à une occupation du sol artificialisée et à la circulation des véhicules. Dans le cas des routes, d'autres paramètres interviennent comme l'intensité du trafic, la largeur de la route, le revêtement, la présence et les caractéristiques des bas-côtés, l'éclairage artificiel et les lumières ponctuelles des voitures, la pollution de l'air et du sol due aux rejets de particules et entraînant des changements dans la composition chimique de l'environnement des routes, le bruit des moteurs, les vibrations du sol. Ces facteurs sont résumés sur la Figure I.4 (Van der Zande *et al.*, 1980 ; Seiler, 2001).

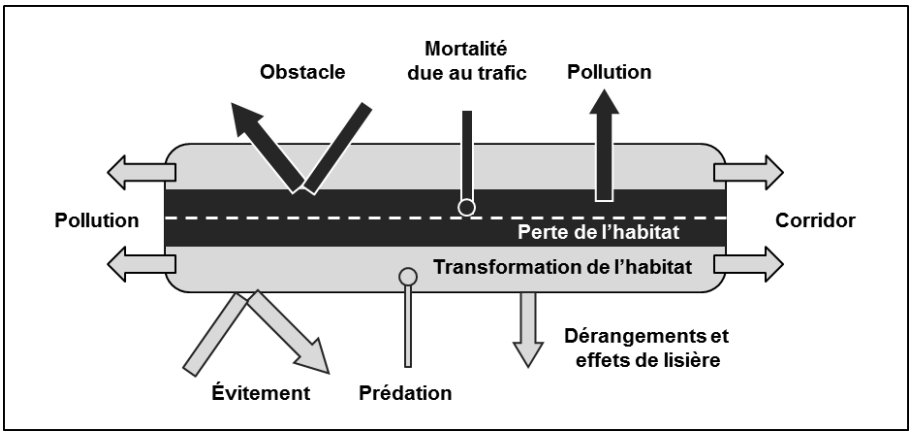


Figure I.4. Les conséquences des routes sur la faune, d'après Van der Zande *et al.* (1980) dans Seiler (2001).

Les conséquences a priori négatives des routes sur la faune sauvage sont :

- la fragmentation de l'habitat et l'effet de barrière qui se traduit par le fait que les animaux ne traversent pas ou peu un élément du paysage. Les routes représentent des coupures dans les habitats naturels. Ces coupures correspondent à une rupture de nature de sol et à un frein dans les déplacements de part et d'autre de la route, à cause du trafic, du changement de l'occupation du sol sur et autour de la route ;
- les collisions avec les véhicules : ce problème a pris de l'ampleur avec l'augmentation du nombre de routes et la fragmentation des habitats résultante qui pousse les animaux à des traversées. Les implications en termes de coût économique sont non négligeables, ces collisions pouvant avoir de plus des conséquences sur les vies humaines et animales ;
- une diminution de la qualité de l'habitat adjacent aux routes. L'ouverture de l'espace par les routes amène des changements dans les caractéristiques physiques. Elle apporte tout d'abord une exposition visuelle plus grande à la prédation. D'autres dérangements sont possibles : la luminosité y est accrue et la pénétration du vent est favorisée. Les animaux y sont davantage sujets à l'exposition des polluants émis par les véhicules, ce qui peut aussi avoir un effet sur la composition végétale des bords de routes (Coffin, 2007 ; Balkenhol & Waits, 2009). Les routes peuvent par ailleurs favoriser la propagation de plantes invasives qui modifient l'intérêt en ressources pour la faune ;
- des perturbations dans les comportements : Trombulak et Frissel (2000) identifient les conséquences des routes et du trafic routier sur le bon état des écosystèmes et des communautés animales. Ces auteurs résument les changements apparaissant dans les comportements de la faune : modification des lieux de vie, perturbations dans les déplacements habituels et dans les comportements de fuite – lieux fréquentés préférentiellement, traversées, distraction due aux voitures –, changement des taux de

natalité et de mortalité en positif ou en négatif selon les cas, modification de l'état physiologique par exemple due au stress.

Les voies ferrées représentent pour beaucoup d'espèces animales des obstacles infranchissables. La traversée peut être rendue difficile par la présence de clôtures autour des voies et par l'aménagement de talus correspondant à des ruptures de pentes. Pour les espèces de petites tailles non gênées par les clôtures ou les espèces qui volent, les voies représentent aussi une barrière vis-à-vis du déplacement. Le franchissement peut être stoppé par des modifications de nature de sol : absence de végétation, revêtement minéral. Les voies ferrées jouent également un rôle dans la fragmentation du paysage et dans la perte en qualité des habitats.

Le cas des routes est intéressant. Elles sont importantes à prendre à compte dans l'évaluation de l'état des écosystèmes car elles représentent un bon indicateur du développement des activités humaines. La création de routes et l'augmentation des activités anthropiques sont concomitantes (Bretagnolle, 2009). Dans les zones en voie d'urbanisation, les routes représentent des axes d'accès qui ensuite favorisent la densification et l'extension de ces zones. Dans les zones forestières, la création de routes s'effectue souvent en lien avec l'exploitation industrielle du bois. Aux États-Unis et au Canada, de nombreuses routes forestières sont créées tous les ans pour faciliter l'évacuation des grumes. Les politiques de certains pays prennent en compte les effets négatifs sur les écosystèmes de ces routes d'exploitation. Elles incitent à réduire leur nombre et à les abandonner après l'exploitation, comme décrit dans Bourgeois *et al.* (2005). Ce même auteur souligne que les routes ont des conséquences au-delà de leur simple emprise. Les routes forestières favorisent des activités susceptibles de perturber la faune : tourisme notamment cycliste et motorisé, exploitation par des particuliers des ressources offertes par la forêt comme par la cueillette, et à plus grande échelle l'exploitation minière. L'exploitation des ressources hydrauliques, des lacs et rivières, est favorisée. Les activités humaines comme la chasse dans les zones agricoles et forestières près des routes sont à prendre en compte. Les routes incitent à une utilisation hors de leur surface stricte et amènent des dérangements non seulement par leur rôle dans la fragmentation des paysages mais également par les dérangements humains sur et autour de son axe (Sétra, 2000). La présence de voitures sur une route augmente la présence de piétons dans les zones à proximité des routes : touristes, randonneurs ou simplement automobilistes à l'arrêt, comme mentionné dans l'étude de Huijser & Berger (2000). Il reste difficile de séparer les causes possibles des réponses comportementales des animaux vis-à-vis des routes. Les différents facteurs interagissent souvent entre eux, par exemple le long d'une chaîne trophique : des proies qui restent éloignées des routes à cause d'un habitat non adapté peuvent entraîner un évitement des routes par les prédateurs.

- Présentation d'études sur les effets des infrastructures selon les espèces animales

Les infrastructures de transport peuvent avoir des effets négatifs mais aussi, de manière inattendue, positifs sur les populations animales. Nous mentionnons ci-dessous différentes études regroupées selon la taille et le mode de déplacement des espèces. Ces études illustrent le fait que les effets des infrastructures existent pour la majorité des espèces, même s'ils dépendent du contexte paysager et des espèces présentes dans les écosystèmes.

Pour les amphibiens, les routes sont de manière générale des freins aux déplacements et dégradent la qualité de leur habitat. Les amphibiens ont en effet une capacité de dispersion moindre et ils sont sensibles à l'altération de leur habitat. Marsh *et al.* (2005) ont trouvé une influence des routes forestières dans les déplacements de dispersion des salamandres rayées (*Plethodon cinereus*). Ces routes réduisent leurs déplacements d'environ de moitié dans le cadre

de leur expérimentation. Certaines populations d'amphibiens sont d'autant plus fragilisées que les routes traversent des zones de migration. Dans le cas du crapaud commun (*Bufo bufo*), quatre migrations annuelles ont lieu : la migration printanière entre zone d'hivernage et zone de reproduction, la migration-retour, l'essaimage des jeunes et la migration d'automne (ANA, 2002). La présence de routes entre les différentes zones de vie augmente donc la mortalité lors des traversées, par écrasement ou par des phénomènes de tourbillon qui les plaquent au sol. Les voies ferrées peuvent également arrêter les amphibiens par un accès difficile – grillage, talus – et une faible végétation au sol.

D'autres espèces sont touchées par les effets négatifs des infrastructures linéaires. Des effets de barrière aux déplacements sont observés pour plusieurs espèces de mammifères. Des résultats d'un protocole de capture-marquage-recapture sont illustrés en Figure I.5, à partir d'une étude similaire de Mader (1984) et Mader *et al.* (1990) : les traversées d'une route par des petits mammifères et d'une voie ferrée par des coléoptères. Le nombre de traversées est nul sur l'échantillon étudié de petits mammifères. Les coléoptères, qui sont capables de voler, traversent mieux la voie de chemin de fer mais leurs déplacements semblent assez limités.

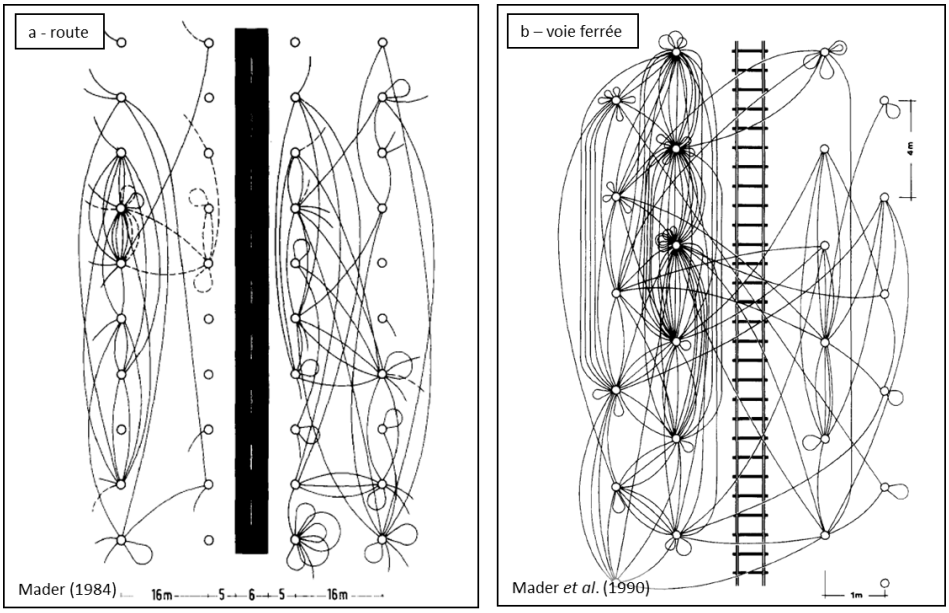


Figure I.5. Diagramme des déplacements de petits mammifères terrestres et d'insectes volants à partir d'un protocole de capture-marquage-recapture. Les individus suivis traversent peu les infrastructures linéaires : a) mulot à collier (*Apodemus flavicollis*) et campagnol roussâtre (*Clethrionomys glareolus*) près d'une autoroute (Mader, 1984), b) coléoptères (*Pterostichus melanarius*) près d'une ligne de chemin de fer (Mader *et al.*, 1990).

McGregor *et al.* (2008) s'interrogent sur les causes de l'évitement des routes chez les petits mammifères : la souris à pattes blanches (*Peromyscus leucopus*) et le tamia rayé (*Tamias striatus*). L'évitement est estimé à partir d'une délocalisation de l'autre côté d'une route et de la vérification d'un retour au site d'origine. Il apparaît que dans ce cas d'étude, le trafic ne semble pas avoir d'influence sur les traversées. L'objet route serait par contre limitant pour les raisons évoquées précédemment : milieu ouvert[9], matériau, accès difficile à cause de talus.

Dans De Sadeleer *et al.* (2003), une synthèse des études relatives au transport est proposée. Les infrastructures ferroviaires sont estimées avoir des conséquences négatives importantes pour la

[9] Un milieu ouvert est un milieu avec un taux de recouvrement faible par la végétation ligneuse. Par opposition, on parle de milieu fermé.

plupart des amphibiens et mammifères mais moindres pour les insectes dont les carabes et les sauterelles. Une autre étude a été menée en République Tchèque par Rico *el al.* (2007) sur la réponse de petits mammifères à des routes forestières. Les espèces étudiées sont cette fois : la musaraigne commune (*Sorex araneus*), le mulot à collier (*Apodemus flavicollis*), le campagnol des bois (*Clethrionomys glareolus*). Les résultats montrent un effet de barrière important des routes larges sur les trois espèces. Les routes étroites, moins de 7 mètres de largeur, représentent également des barrières aux déplacements mais majoritairement pour les musaraignes et moins pour les mulots et les campagnols. Ceci soutient l'hypothèse que l'ouverture du milieu, notamment en zone forestière, est un facteur limitant les déplacements chez les petits mammifères. La nature du revêtement de la route ne semble pas influencer le nombre de traversées. Le trafic apparaît aussi comme non influant mais les auteurs soulignent le fait que ce facteur est difficile à isoler des autres car sur le site d'étude, il est corrélé à la largeur de la route. Ces mêmes auteurs (Rico *el al.*, 2007) soulignent le fait que cette étude contribue à illustrer l'importance des effets négatifs des routes sur les petits mammifères. En parallèle d'autres études, elle nuance les premières hypothèses selon lesquelles les petits mammifères étaient moins impactés par les routes que les grands, hypothèses dues au fait que les populations de petits mammifères sont souvent denses et qu'ils sont de petite taille donc moins freinés dans leur déplacement par des obstacles. L'effet de barrière des routes existent pourtant pour les petits mammifères. Il peut se traduire par une différenciation génétique plus grande entre individus de chaque côté d'une route qu'entre individus situés d'un même côté, ce qui tend à montrer un diminution du brassage génétique (Shephard *et al.*, 2008). Les traversées des routes sont limitées et ne sont pas toujours réalisables en souterrain par de petits tunnels comme les canalisations artificielles. Nous reviendrons sur ce point à propos des installations réalisées en faveur des déplacements en section I-2.
Certains effets des infrastructures de transport sont pourtant positifs pour les petits mammifères. Les grandes routes et les routes bordées par des propriétés privées ou des champs agricoles sont moins sujettes au passage de piétons. Elles limitent la proximité entre piétons et animaux et favorisent donc la présence d'animaux. Les fossés, les digues, les petites friches le long des voies représentent des lieux attracteurs pour la petite faune par leur offre en habitat ou en cachettes. Selon la nature pédologique des alentours, les sols peuvent être plus ou moins favorables à la construction de terriers et de réseaux souterrains. Ces différents aspects montrent que les facteurs de présence ou d'éloignement des routes sont multiples et qu'ils sont liés entre eux.

Les mammifères de taille plus importante comme les lagomorphes ou les petits carnivores sont aussi influencés par la présence des routes. Selon les espèces, ils subissent de manière plus ou moins prononcée les coupures créées et la réduction de leur habitat (Letty *et al.*, 2005). La perturbation du milieu naturel par les routes et les exploitations qui en sont faites peuvent modifier la présence des animaux. Les espèces généralistes comme le renard, moins attachées à un type de milieu particulier, sont a priori moins sensibles à la fragmentation du paysage, entre autres par les routes. Les routes restent cependant des obstacles traversables ou non selon leur importance, et leur traversée représente dans tous les cas une prise de risque. Les voies ferrées peuvent quant à elles représenter dans certains cas des zones de corridors. Certaines espèces peuvent utiliser ces voies comme des lieux de déplacements, tel le renard (Trewhella and Harris, 1990). Leur configuration et la faible présence d'hommes le long des voies peuvent favoriser une certaine biodiversité (FNE & RFF, 2012 ; Sétra, 2007). La présence de végétation dans le voisinage des voies peut attirer certains insectes, comme dans le cas des coléoptères dans l'étude de Mader *et al.* (1984) (cf. Figure I.5).

L'impact des routes sur les grands mammifères correspond à de nombreux enjeux, écologiques et symboliques mais également de sécurité en lien avec les risques de collisions avec les véhicules. De nombreuses études en France portent sur les traversées des cervidés et des sangliers. Les populations de chevreuils et de sangliers ont en effet fortement augmenté dans la deuxième moitié du XXème siècle et elles recouvrent la quasi-totalité du territoire (Vignon et Barbarreau, 2008). L'ONCFS effectue des suivis de populations par espèce. Ces suivis servent à déterminer l'évolution du nombre d'individus par espèce et par zone géographique. Ils sont accompagnés d'études sur l'occupation de l'espace par les animaux et sur les variables environnementales influençant la présence de la faune. Concernant les effets des infrastructures routières sur la grande faune, une mortalité accrue des animaux est observée (Couderc, 1980). Les conséquences de la création de nouvelles routes conduisent potentiellement à la limitation de la traversée par les individus. Les populations peuvent être séparées. La diminution des échanges entre les individus amène à l'isolement de sous-populations, isolement géographique conduisant à un appauvrissement génétique. Pour les déplacements de dispersion ou de migration, cela peut représenter des dangers supplémentaires. Les études sur les trois espèces, cerf (*Cervus elaphus*), chevreuil (*Capreolus capreolus*) et sanglier (*Sus scrofa*), montrent une diminution des collisions et des traversées lorsque les routes sont longées par des grillages (Sétra, 2007). Par contre, ces grillages augmentent d'autant plus l'imperméabilité des routes. Des suivis sur les rennes en Norvège ont conclu à un évitement des zones situées autour des routes, l'effet de barrière étant d'autant plus important lorsqu'il était combiné avec celui d'autres infrastructures linéaires (Nellemann *et al.*, 2001). Les collisions sont également fonction de l'importance du trafic, ce qui tend à indiquer que les routes n'empêchent pas les traversées même si elles les limitent.

Les espèces susceptibles de marcher sur de grandes distances sont potentiellement soumises à un nombre important de dérangements et d'obstacles dans leurs déplacements quotidiens. En plus du danger que représentent les traversées, certaines routes peuvent agir comme des barrières plus ou moins faciles à franchir. C'est le cas des grands prédateurs qui possèdent de larges territoires. Aux États-Unis, les ours sont particulièrement étudiés. Ils réagissent différemment aux routes selon la composition de leur domaine de vie, la gêne provoquée par le trafic et l'offre en nourriture à proximité. Les ours noirs (*Ursus americanus*) étudiés dans un parc naturel en Caroline du Nord sont plus sensibles aux routes à trafic important lorsque ce type de routes est très présent dans leur domaine vital (Beringer *et al.*, 1990). Pour les routes faiblement fréquentées par les véhicules, les traversées sont positivement corrélées avec la densité du réseau routier. Les conclusions sont que de petites différences de trafic ou de volume sonore dû au trafic n'influencent pas le nombre de traversées mais que les routes importantes limitent les déplacements. Le constat d'un faible évitement des routes à circulation limitée est vérifié dans l'étude de Yost et Wright (2001). Les grizzlys (*Ursus arctos*) et les caribous (*Rangifer tarandus*) ne montrent pas de préférences particulières pour des zones situées loin des routes. Seuls les orignaux, ou élans (*Alces alces*), sont moins présents près des routes. Dans tous les cas, les espèces sont fortement influencées par la présence de ressources alimentaires et il est suggéré dans l'article précédent que la présence d'une végétation riche attirerait les animaux sur le bord des routes même avec de la circulation. C'est également le cas dans l'étude de Bortolamiol *et al.* (2012) sur les chimpanzés (*Pan troglodytes schweinfurthii*). Ceux-ci se sédentarisent à proximité des ressources alimentaires qui elles-mêmes peuvent se situer près d'une route importante. De la même manière que pour les plus petites espèces, les abords des routes jouent un rôle. Les routes constituant de larges ouvertures sont davantage évitées dans le choix des domaines de vie par les grizzlys. Les routes longées par de la végétation ou par des barrières comme des murs ou des rochers ont peu d'influence (Wakkinen et Kasworm, 1997). La fermeture des routes par

de la végétation peut favoriser l'utilisation de leur voisinage comme lieu de déplacements ou plus généralement d'habitat (Kaswor et Manley, 1990).
D'autres grands carnivores comme le lynx (*Lynx rufus*) sont sensibles aux routes dans le choix de leur habitat et dans leurs déplacements (Lovallo et Andersen, 1996). Il est observé que leurs lieux de vie englobent préférentiellement des zones avec peu d'autoroutes ou de routes à forte circulation. Par contre, les sentiers auraient plutôt tendance à être favorables à leurs déplacements car ils sont facilement praticables. L'évitement des routes importantes vient de leurs caractéristiques physiques – largeur, revêtement, aménagement des bas-côtés – et du trafic associé, volume sonore notamment. Ces grandes routes peuvent donc avoir une influence sur les contours de l'espace de vie et dans les déplacements à l'intérieur de cet espace. Dans une étude dans les Rocheuses canadiennes, Apps (2000) constate que le nombre de traversées des autoroutes par les lynx est d'autant plus faible si le nombre d'autoroutes à l'intérieur des domaines vitaux est grand.
Un autre grand prédateur dont les capacités de dispersion soulèvent des interrogations est le loup. En Espagne, les réponses de loups ibériques (*Canis lupus signatus*) à des barrières humaines et naturelles ont été étudiées par Blanco *et al.* (2005). Le premier obstacle est une autoroute entourée par des grillages et dont les seuls lieux de traversées sont des ponts du réseau routier. Le second frein au déplacement sur le site d'étude est un fleuve. Les observations montrent que les traversées de l'autoroute sont fréquentes, qu'elles soient motivées par la présence de ressources ou par l'exploration. Le fleuve représente par contre une barrière plus importante que les routes et les traversées ont été effectuées suite à des modifications peu favorables du territoire d'origine des loups. La recolonisation du territoire français par les loups italiens n'a a priori pas été bloquée par les grandes infrastructures de transport (FERUS, 2007).
En Figure I.6, les déplacements d'un loup recueilli après avoir été blessé suite à une collision avec un véhicule et équipé d'un collier GPS, s'étalent sur plus de 300 km entre les deux extrémités de son trajet de neuf mois, avec des parcours de plusieurs dizaines de kilomètres par jour (JNE, 2004). Cet exemple illustre l'importance des distances parcourues et la capacité de dispersion de cette espèce.

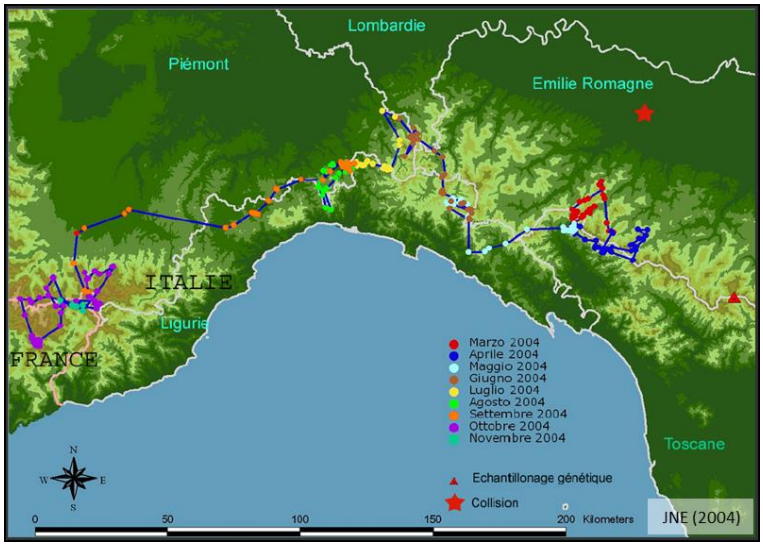


Figure I.6. Cartographie des déplacements d'un loup italien de mars à novembre 2004, une même couleur des localisations correspond à un mois (JNE, 2004).

Les routes, notamment les autoroutes, restent des zones de fortes activités et les traversées par les loups sont très souvent effectuées de nuit (Musiani *et al.*, 2010). Ces traversées peuvent avoir lieu sur l'autoroute elle-même ou plus généralement en empruntant le réseau routier

secondaire. Les loups gardent un comportement d'évitement vis-à-vis du réseau routier en privilégiant un franchissement des voies à des moments de faible trafic et à des endroits peu fréquentés. Outre les perturbations et les risques de mortalité, les routes représentent des coupures dans les espaces parcourus par les loups. Elles entraînent une fragmentation des milieux qui leur est principalement préjudiciable. La perte de l'habitat des loups comme les forêts et les zones peu anthropisées, peuvent être une menace pour la santé des individus et des populations, directement ou indirectement via l'état des populations de proies (Salvatori & Linnell, 2005). En revanche, dans l'exemple précédent, la déprise pastorale et la reconquête forestière a constitué un facteur favorable aux déplacements du loup. D'autres études montrent que les loups peuvent s'aventurer dans des zones habitées (Moriceau & Madeline, 2010).

Les oiseaux et les chiroptères sont concernés par les effets des routes. Dans Bautista *et al.* (2004), neuf espèces de rapaces sont observées afin de déterminer si une relation existe entre l'intensité du trafic et leur distance aux routes à forte fréquentation. Trois espèces ont montré un évitement des routes pendant les week-ends où le nombre de véhicules est plus élevé. Ces observations montrent que les rapaces diurnes sont plus ou moins sensibles au trafic et aux perturbations induites selon les espèces, comme illustré en Figure I.7. Dans le cas des rapaces, la présence de proies le long des routes est déterminante, les deux sont souvent étudiés conjointement. Deux aspects à conséquences contradictoires se superposent : les routes peuvent déranger la chasse par le bruit et une mauvaise visibilité des bas-côtés, et les routes peuvent favoriser la chasse en piégeant les proies et en les concentrant sur leur bordure. Le type de déplacement des oiseaux importe, en particulier dans le cas des rapaces celui lié à la méthode de chasse. Certaines espèces repèrent leur proie principalement par des vols de surveillance. Les abords des routes se révèlent alors peu intéressants car la concentration des proies se limite aux bords de routes souvent trop étroits pour un repérage. Meunier *et al.* (2000) montre par contre que les espèces utilisant des perchoirs fixes surplombant le sol trouvent un intérêt près des routes bordées par des grillages ou par des sites d'observation : poteaux, lignes électriques, clôtures, arbres. Les différents types de routes ont alors peu d'influence sur la présence des rapaces.

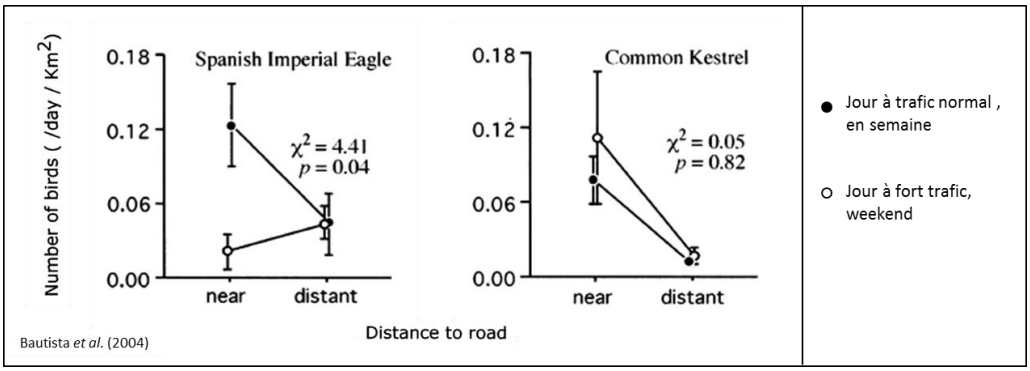


Figure I.7. L'évitement des routes et de leur trafic dépend des espèces de rapaces. Moyenne et erreur standard du nombre de rapaces par jour et par km², selon qu'ils sont proches ou distants de la route étudiée. À gauche : aigle ibérique (*Aquila adalberti*), à droite : faucon crécerelle (*Falco tinnunculus*) (Bautista *et al.*, 2004).

Un fort évitement des routes par des espèces de charognards peut être observé. Contrairement à certaines espèces de rapaces qui récoltent les proies tuées par des véhicules (Bautista *et al.*, 2004), les grands charognards se nourrissent de carcasses de plus grands animaux comme des carcasses de bétail. En Argentine, le condor des Andes (*Vultur gryphus*) a un comportement

différent lors de la curée[10], selon qu'ils sont près ou loin des routes à forte circulation (Speziale *et al.*, 2008). Ils restent en effet moins longtemps sur leur proie moins de temps au repos dans les endroits proches des routes.
Les techniques de vol peuvent favoriser le nombre de collisions avec des véhicules, ainsi que les aménagements du bord ou du voisinage des routes. Le vol bas de la chouette effraie (*Tyto alba*) l'expose à une mortalité élevée si leur territoire de chasse est traversé par des routes (Boves et Belthoff, 2012). Une étude sur cette même espèce menée par Massemin & Zorn (1998) montre des points noirs de mortalité où les routes sont entourées par un milieu ouvert avec absence de haies. L'adaptation des espèces aux routes peut être l'évitement par la conservation d'une distance d'éloignement : c'est par exemple le cas pour certaines espèces de chauves-souris (Zurcher *et al.*, 2010). Le risque de collision est non négligeable même pour les oiseaux ou pour les chauves-souris. Il concerne principalement les juvéniles qui sont moins expérimentés dans leur vol et moins alertés face aux dangers des véhicules. Contrairement à la prédation naturelle, il semblerait qu'une sélection des animaux en moins bonne condition physique, blessés ou malades, ne soit pas observée. Les oiseaux tués par collision ne sont pas plus faibles que les autres, observation vérifiée par exemple sur trois espèces de passereaux (Bujoczek *et al.*, 2011).

Pour conclure, l'impact des infrastructures linéaires de transport dépend des espèces considérées ainsi que des caractéristiques des routes elles-mêmes. Ces infrastructures ont une incidence sur le taux de mortalité des individus qui les traversent par besoin de migration ou de déplacements sur des longues distances notamment. Elles influencent également la répartition des populations en réduisant les traversées. Les zones d'habitat favorable aux espèces sont fragmentées par des obstacles aux déplacements, réduisant les échanges entre populations et limitant les domaines de vie des individus. Ces infrastructures rendent nécessaires des modifications dans le comportement des individus et dans la répartition des populations.

L'hydrographie

Des barrières par des éléments souvent qualifiés de naturels existent. C'est le cas de l'hydrographie. Celle-ci est en fait souvent aménagée que ce soit au niveau des cours d'eau, des zones humides ou du littoral. Des effets de barrière ont pu être observés par des études de distance génétique sur les populations animales. Les distributions des individus suggèrent des obstacles aux déplacements. Par exemple dans Cosson *et al.* (2006), les chevreuils semblent arrêtés par la Garonne car ils sont répartis en deux populations d'un côté et de l'autre du fleuve. Outre les fleuves et les rivières présentant une continuité linéaire sur de longues distances, l'hydrographie comprend aussi d'autres types d'éléments plus ou moins ponctuels : lac, succession d'étangs, marais, pouvant être plus ou moins exploités par l'homme. Marchandeau *et al.* (2003) ont montré une influence de plusieurs étangs sur la répartition de population de lapins de garenne (*Oryctolagus cuniculus*), comme illustrée en Figure I.8. Les fortes concentrations d'individus se situent de part et d'autre des étangs, ce qui suggère que les lapins circulent peu entre les différentes rives. Les étangs jouent ici un rôle de limitation des déplacements.

[10] Terme consacré pour le repas notamment de carcasses pour les espèces de charognards.

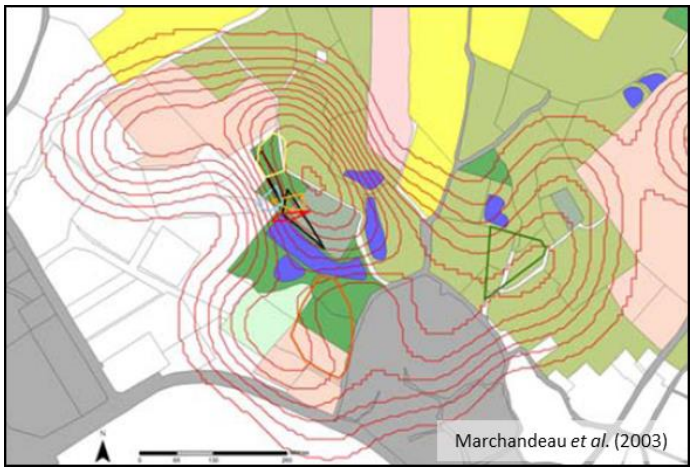


Figure I.8. Effet spatial d'étangs sur une population de lapins de garenne à partir de l'estimation par noyaux des domaines vitaux dans les Deux-Sèvres par Marchandeau *et al.* (2003). Les étangs sont représentés en bleu et les autres aplats de couleurs sont l'occupation du sol en fonction du type de cultures. Les lignes rouges correspondent à la probabilité de présence des lapins : forte probabilité de présence au centre, qui diminue vers l'extérieur.

Les grands fleuves sont des barrières pour la grande faune comme le loup dans la détermination de leur territoire. Ils peuvent retarder l'expansion de leur dispersion (Blanco *et al.*, 2005). En France en particulier, la zone de présence de la population de loups venus d'Italie est restée contenue pendant quelques années dans le sud-est des Alpes depuis leur arrivée au début des années 1990. Des indices de présence ont montré en 1995 que le Rhône avait été finalement traversé permettant la colonisation de nouveaux territoires en zone de présence permanente, c'est-à-dire constatée pendant deux hivers successifs : dans les Pyrénées à partir de 2008 et dans le Massif Central en 2009 (DREAL Rhônes-Alpes, 2011).

Le relief

Chaque espèce animale possède une appréhension particulière du relief. En laissant de côté la répartition des espèces en fonction de l'altitude, la pente joue un rôle dans les déplacements. Plusieurs études ont montré une utilisation différente des pentes selon les classes de valeurs et en prenant en compte le contexte paysager. Dickson & Beier (2007) ont par exemple constaté que les pumas (*Puma concolor*) utilisent préférentiellement les pentes douces et les fonds de vallées dans une zone de moyenne montagne de Californie. Dans Kie *et al.* (2005), une analyse des déplacements des cerfs (*Cevus elaphus*) met en évidence que ceux-ci suivent le sens de la pente plutôt que leurs perpendiculaires. Dans Marsh *et al.* (2005), les salamandres rayées semblent influencées par la pente des talus sur le bord des routes. Pour cette espèce, les descentes apparaissent comme un obstacle aux déplacements davantage que les montées. D'autre part, les communautés végétales dépendent de l'orientation de la pente, ce qui peut être relié à une présence accrue des animaux (Stewart *et al.*, 2010). Dans Apps (2000), les lynx se déplacent préférentiellement dans des altitudes intermédiaires et sur des pentes douces, qui correspondent à des habitats favorables notamment pour la présence de proies. Cette préférence peut aussi être due à une réduction des efforts et des dépenses énergétiques.

Effets de certains éléments du paysage d'origine anthropique

Le développement des activités humaines et leur modernisation ont entraîné la construction et l'évolution de certains aménagements. Ces changements peuvent avoir une emprise surfacique faible ou représenter des évolutions subtiles. Par exemple, la modernisation des bâtiments

notamment des bâtiments agricoles et des granges ouvertes réduit le nombre de lieux de nidification (Andrusiak, 2010). Ces modifications peuvent concerner qu'un aspect de vie des animaux, mais la répercussion s'effectue sur l'ensemble du cycle biologique. L'ordre des chiroptères est particulièrement touché par des changements de paysage. De nombreuses espèces de chauves-souris sont attachées à plusieurs zones de vie évoluant au cours de l'année (Vincent *et al.*, 2011). Les différents sites de nidification et d'hibernation ainsi que les gîtes de printemps et les gîtes d'automne tendent à disparaître : granges, cavités naturelles, creux sous les ponts. Cela peut les amener à s'installer dans des lieux moins propices à leurs besoins : toits de maisons avec des dérangements plus importants, grottes plus accessibles. Par exemple à Paris, une colonie de pipistrelles communes (*Pipistrellus pipistrellus*) est installée dans un tunnel situé le long de la Petite Ceinture (Arnal *et al.*, 2006).

Les pales des éoliennes peuvent perturber ou tuer oiseaux et chiroptères au cours de leurs déplacements (Rydell *et al.*, 2010). Les oiseaux migrateurs qui parcourent les zones d'installations de manière brève sont également touchés, même si ceux-ci volent généralement suffisamment hauts pour les appréhender à distance et les éviter. Les perturbations dues aux chantiers de construction et à l'artificialisation d'un parc éolien peuvent avoir des conséquences plus importantes sur les espèces que les collisions elles-mêmes (Thonnerieux, 2005). D'autres éléments comme les lignes électriques présentent aussi un danger pour les oiseaux.

Certains milieux sont associés à des activités humaines particulières. Les milieux montagnards sont a priori moins perturbés par une artificialisation massive mais ils accueillent des activités de plein air et notamment des sports d'hiver. Les aménagements réalisés pour ces activités entraînent des perturbations dans l'habitat de la faune. Les études sur le tétras lyre (*Tetrao tetrix*) et sur les lagopèdes alpins (*Lagopus mutus*) montrent l'impact des pistes de ski sur leurs zones d'occupation : diminution de leur habitat, stress, portées moins nombreuses, morts accidentelles (Braunish *et al.*, 2011 ; Watson & Moss, 2004). Pour la marmotte (*Marmota marmota*), espèce de moyenne altitude (environ 1000-2000 m) et de haute montagne, les conséquences des activités humaines peuvent être des déplacements plus petits dans les domaines vitaux et donc une limitation pour la recherche de nourriture (Ramousse *et al.*, 1999).

1.2.4. Les effets des changements environnementaux et des aménagements sur la faune

Les transformations du paysage ont des répercussions sur les espèces végétales et animales qui voient leur habitat se modifier et qui sont poussées à s'adapter ou à se déplacer vers des milieux préservés. De nombreux évènements intervenus au cours du temps comme les activités sismiques ont bouleversé l'environnement d'un point de vue des éléments du paysage et des conditions climatiques et atmosphériques. Le règne animal s'est développé suite à l'apparition et la disparition des espèces. La répartition de la faune sur la surface du globe a évolué en suivant les modifications environnementales. Les changements actuels relèvent de combinaisons de facteurs dont une partie est le fait des hommes. Ils correspondent à des changements directs sur les paysages et à des changements indirects par exemple via la contribution aux fluctuations de la température qui font évoluer la composition des milieux et entraînent des bouleversements dans les écosystèmes.

L'influence des variables météorologiques, des caractéristiques des habitats et de l'occupation humaine a été étudiée en Espagne par Moreno-Rueda & Pizarro (2009). Elle varie selon les espèces animales, ce qui pousse à conserver une lecture plurielle de l'environnement dans son influence sur les dynamiques de populations et sur les déplacements. Les études de l'influence

des changements de l'environnement sur la faune concernent des suivis de populations, sur une partie ou sur l'ensemble de leur cycle biologique, et sur un espace plus ou moins étendu. Un exemple de modifications d'environnement par des évolutions climatiques est étudié dans Jewett *et al.* (2011). Il s'agit d'un glissement de l'aire de répartition du pin à écorce blanche (*Pinus albicaulis*). Ce changement a des conséquences sur la faune pour laquelle le pin constitue une ressource alimentaire. C'est notamment le cas des grizzlys (*Ursus arctos horribilis*). Les modifications dans le paysage peuvent provoquer une baisse de la qualité des habitats dans lesquels vivent et se déplacent les animaux (Anizoba & Obudulu, 2006). La qualité des habitats est liée à la disponibilité en lieux pour la nidification, l'établissement de terriers et de gîtes de repos, ainsi qu'à des besoins en ressources alimentaires. Les modifications environnementales peuvent entraîner des migrations chez les espèces animales et des évolutions sur leur densité et leur distribution. Elles peuvent également être accompagnées d'adaptation au niveau morphologique des individus et au niveau des dynamiques de populations (Jacobson *et al.*, 2004 ; Yom-Tov, 2001). Ces adaptations sont fonction de la spécialisation des espèces vis-à-vis de leur habitat et des ressources disponibles. En parallèle, il semble que les distances de dispersion[11] soient un paramètre à prendre en compte dans la spécialisation des espèces animales. Selon Clavel (2007), les distances de dispersion observées présentent une plus grande variance chez les espèces généralistes[12]. Déplacements et changements de l'environnement semblent liés à la capacité d'adaptation des espèces. Les adaptations à l'occupation humaine sont plus nombreuses chez les espèces généralistes : les ressources fournies par les activités des hommes (agriculture, élevage, déchets) représentent une alimentation facile même si l'évitement des hommes eux-mêmes demeure (Blanco *et al.*, 2005) (Parr & Duckworth, 2007).

Les modifications du paysage par les activités humaines sont l'objet de réflexions et de suivis quant à leurs effets sur les écosystèmes. La limitation et la compensation de ces modifications correspondent souvent à des aménagements préservant une partie de l'habitat ou établissant des connexions entre les habitats non touchés. Ces aménagements sont valables pour des modifications spatiales. Pour les causes indirectes du déclin de la biodiversité comme la pollution de l'air ou une évolution de la température, des mesures plus globales sont souvent nécessaires mais aussi plus difficiles à mettre en œuvre. Les approches de préservation diffèrent selon le territoire et la faune présente sur un territoire. Les mesures en faveur des écosystèmes peuvent aussi être très éloignées de la préservation des espèces animales même si elles sont inscrites dans une démarche globale : développement durable via de meilleures performances énergétiques et une réduction de la pollution, traitement des déchets. Pour la préservation de la faune, un point fondamental est la conservation de lieux de vie, de ressources et si besoin de lieux pour se déplacer entre les zones d'intérêt.

Les perturbations dans l'environnement n'ont pas que des effets négatifs car certaines espèces s'adaptent ou se dispersent. Une perturbation est ici entendue dans le sens d'un évènement discret dans le temps qui provoque des changements dans la structure des écosystèmes à des échelles spatiales variées (Pickett & White, 1986). La théorie de la perturbation s'intéresse aux

[11] La dispersion correspond à un déplacement d'un ou de plusieurs individus par rapport à une zone de vie d'origine. Plusieurs causes de dispersion existent. Par exemple la dispersion juvénile correspond à une migration des jeunes à la recherche d'un nouveau territoire.

[12] Une espèce généraliste est une espèce qui a des exigences larges en termes de type d'habitat et de ressources, correspondant à une niche écologique large. Elle s'adapte par conséquenct mieux à des modifications du paysage. En opposition sont les espèces spécialistes. Cette classification est surtout appliquée à la faune. Pour la flore, les traits biologiques permettent de définir l'amplitude écologique plus ou moins large des espèces.

phénomènes perturbateurs d'un équilibre installé qui peuvent notamment être bénéfiques. Par exemple, les feux d'origine naturelle peuvent être suivis par la résilience des écosystèmes (Jacquet & Prodon, 2009) et le rétablissement voire l'enrichissement des communautés même si cette évolution est surtout sur le court terme. Ils peuvent aussi être un outil de gestion du territoire face à la fermeture des milieux.

Cette section s'est attachée à illustrer que les déplacements des espèces sont liés au paysage. Les éléments du paysage qu'ils soient naturels ou aménagés par l'homme influencent les lieux de vie des animaux ainsi que leurs lieux de déplacements. Ces éléments peuvent avoir des influences positives sur les déplacements et la dispersion des espèces alors que d'autres vont avoir un effet de barrière qui limite les populations dans des zones restreintes. La vérification d'hypothèses sur les relations entre déplacements et paysage sont possibles grâce à des observations de la faune et de relevés descriptifs de l'espace. Les méthodes d'observation des déplacements varient selon les espèces suivies. Les connaissances des déplacements ne sont pas les mêmes selon qu'il s'agisse d'insectes, de poissons, d'oiseaux ou de mammifères. De même l'environnement spatial est à considérer différemment. Nous allons voir dans la partie suivante les différentes entités étudiées lors des études sur les déplacements de la faune et de leurs relations à l'espace. Nous revenons par la suite sur l'utilisation des connaissances sur les déplacements dans l'aménagement du territoire et la préservation des écosystèmes.

2) LES CONNAISSANCES SUR LES DÉPLACEMENTS D'ANIMAUX ET LEUR INTÉGRATION EN AMÉNAGEMENT

2.1. Les déplacements d'animaux et les contraintes spatiales

Les suivis des déplacements de faune sont généralement intégrés dans des études plus larges d'éthologie et d'écologie. Les déplacements sont la traduction de besoins et de comportements biologiques auxquels les animaux répondent. Ils s'effectuent dans un cadre contraint par les échanges entre les individus, entre les espèces, et par les éléments du paysage. De multiples facteurs influencent donc potentiellement les déplacements. L'analyse des trajets des animaux peut être effectuée à des niveaux de détail différents. En effet, les déplacements correspondent à des cycles plus ou moins longs dans le temps et s'effectuent sur des espaces plus ou moins étendus. La prise en compte de certains facteurs diffère selon ces échelles spatiales et temporelles. Par exemple, la compréhension des déplacements dans un domaine vital restreint nécessite des connaissances sur l'espace à un niveau de détail plus fin que si l'on étudie les chemins de migrations annuelles sur de grandes distances. Cette partie fait le point sur nos objets d'étude, à savoir ceux qui doivent être considérés lors des analyses de déplacements de la faune : les entités qui se déplacent – individus et populations –, les causes et les types de déplacements, l'espace considéré et son influence sur les déplacements dépendant de certaines de ses caractéristiques.

2.1.1. Les différents aspects des déplacements de la faune

Individus et populations animales

Lorsque l'on s'intéresse aux déplacements de la faune, il convient de préciser quelles sont les entités concernées. Il peut s'agir d'un ou de plusieurs individus étudiés séparément, d'un groupe d'individus organisés socialement, d'une population ou d'une métapopulation (population divisée géographiquement) dont les individus appartiennent à une même espèce, ou encore d'un ensemble d'individus appartenant à des espèces différentes (Lacoste et Salanon, 1999). Les suivis des déplacements s'effectuent sur des échantillons impliquant une sélection d'individus. Les comportements de ces individus particuliers peuvent être plus ou moins généralisés pour la connaissance d'une population ou plus largement d'une espèce. Pour les animaux grégaires, les déplacements observés d'un individu peuvent être associés à un groupe d'individus, concernant les lieux visités, les fréquences de déplacements, les caractéristiques des trajectoires, les éléments intervenant dans les choix de parcours. Pour les animaux ayant un mode de vie plutôt solitaire, le suivi de plusieurs individus permet d'identifier des variations intraspécifiques dans les déplacements. Les comportements sociaux influencent les interactions entre les individus : comportements de compétition, de menace, de protection, parallèlement aux relations de hiérarchie. Même pour les animaux se déplaçant en groupe, chaque individu conserve un espace qui lui est propre et maintient une distance envers les autres membres du groupe (Wynne-Edwards, 1962).

Les comportements des individus peuvent se retrouver au niveau des populations, comme vu en I-1. L'étude des déplacements de plusieurs individus permet à son tour d'estimer les conséquences des infrastructures sur une population. Par exemple, l'effet de barrière des routes sur des souris à pattes blanches est étudié par Merriam *et al.* (1989). La Figure I.9 est une carte des déplacements d'individus dans quatre sites d'étude différents en milieu forestier. La

présence des individus a été relevée à plusieurs moments et de chaque côté de la route. Un faible taux de présence des deux côtés de la route traduit un nombre de traversées restreint. Les pourcentages de souris qui traversent les routes sont plus élevés dans les sites 3 et 4, par rapport aux sites 1 et 2. Cependant, aucune corrélation significative n'est relevée entre le nombre de traversées, les propriétés des routes et les caractéristiques des populations étudiées. Les échanges entre sous-populations, c'est-à-dire entre groupes de souris de chaque côté des routes, peuvent néanmoins être considérés comme réduits sur l'ensemble des sites d'étude. Ce résultat est par ailleurs corroboré par des analyses génétiques.

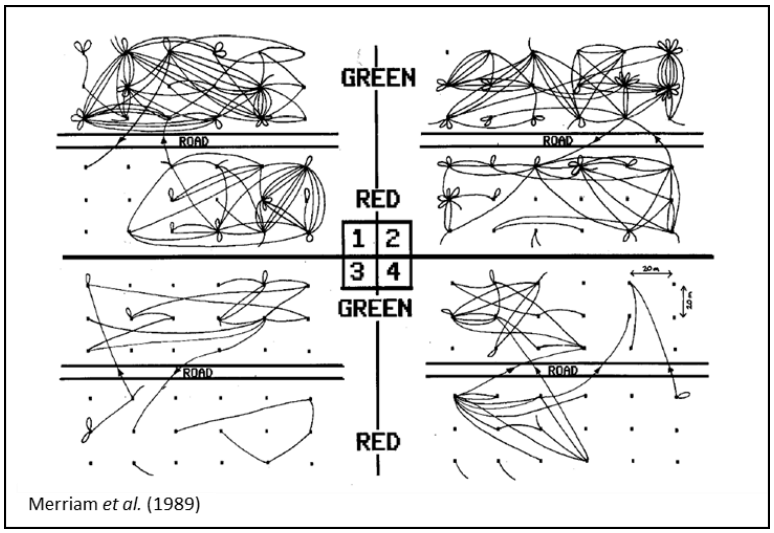


Figure I.9. Déplacements de souris à pattes blanches dans 4 sites d'étude et différenciation des sous-populations (Merriam *et al.*, 1989) : dans les sites 1 et 2, les pourcentages de souris traversant la route sont respectivement de 5 % et de 2 % Dans les sites 3 et 4, les pourcentages sont plus élevées : 25 % et 23 %.

La fragmentation des paysages entraîne la fragmentation spatiale des populations animales (Forman & Alexander, 1998). Cette conséquence peut être observée à partir des déplacements d'individus. Il en est de même pour tous les éléments susceptibles de constituer des perturbations pour les animaux et de morceler les habitats naturels des espèces. L'influence de la structure spatiale des paysages sur les populations animales, leur densité et leurs mouvements, est modélisée par des théories. Ces théories sont issues d'observations. Par exemple, la théorie biogéographique des îles de MacArthur & Wilson (1963) associe la colonisation de zones insulaires à leur superficie et à leur proximité au continent. Les îles les plus proches du continent et les îles regroupées dans un archipel sont plus favorables à l'introduction et à la circulation des espèces végétales et animales. Cet énoncé est vérifié dans l'étude de Simberloff & Wilson (1969) sur plusieurs espèces d'arthropodes dans la baie de Floride. Ces auteurs observent que plus la superficie des îles est grande, plus la capacité d'accueil en nombre d'individus et d'espèces est élevée, ce qui favorise la pérennisation d'une colonisation. Le modèle de l'île est appliqué à la dynamique des populations dans des paysages fragmentés constitués de zones faiblement perméables. L'observation des déplacements réalisés par les animaux permet d'évaluer la connectivité effective d'un paysage fragmenté en particulier, et ainsi de valider ou d'infirmer ce dernier modèle (Mader, 1984).

Au niveau de l'individu, la connaissance des déplacements apporte des éléments explicatifs sur leur comportement. La longueur et la forme des trajectoires renseignent sur les distances parcourues dans des laps de temps donnés, et donc sur les capacités de déplacement des individus d'une espèce. La Figure I.10 est une cartographie des localisations (x, y) enregistrées

sur un ours brun (*Ursus arctos*) en Suède (Dray *et al.*, 2010). Les points ont été liés selon leur chronologie afin de reconstruire un déplacement continu et de calculer des distances.

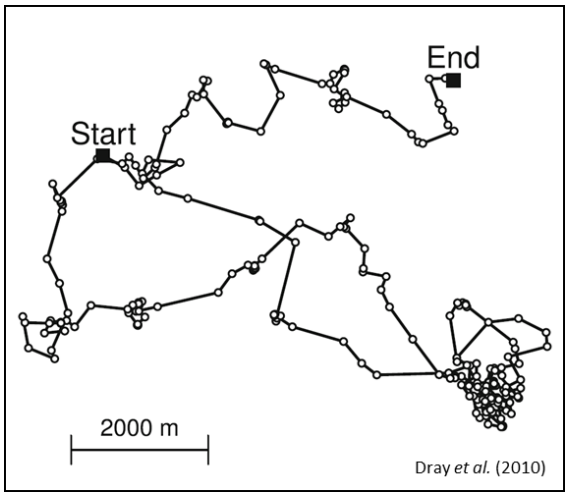


Figure I.10. Trajectoire interpolée estimant les déplacements d'un ours brun en Suède à partir de localisations enregistrées dans le cadre du Scandinavian Brown Bear Research Project (Dray et al., 2010).

La date des déplacements ajoute une information temporelle et rend possible le calcul de vitesses. L'estimation des vitesses associée à celle de la sinuosité de la trajectoire permet de caractériser les activités des animaux : fréquence et lieux privilégiés de recherche de nourriture et de repos (cf. Figure I.10 : deux périodes d'activités séparées par une pause correspondant à un regroupement important des localisations), déplacements exploratoires pour un nouveau territoire ou de nouvelles ressources, interactions sociales, déplacements exceptionnels dus à des perturbations exogènes. Les déplacements des individus renseignent entre autres, sur les relations entre les espèces et les éléments du paysage. Il est possible d'émettre des hypothèses sur les zones favorisant les déplacements, sur les obstacles franchissables ou non, ainsi que sur les lieux favorables à la présence des individus. Leur validation dépend de la précision spatio-temporelle des tracés connus des déplacements et de celle des données géographiques disponibles. Les résultats obtenus à l'échelle locale sont porteurs de conclusions générales. La détection à une échelle fine des chemins empruntés peut conduire à des connaissances plus globales sur l'influence du paysage sur les déplacements d'une population et plus généralement d'une espèce. Le suivi d'individus est donc d'autant plus intéressant lorsqu'il est mené sur un grand échantillon, permettant une généralisation. Nous rappelons à présent les distinctions entre les types de déplacements d'animaux, plus ou moins généralisables pour une espèce donnée. Ces types de déplacements peuvent être comparés entre les individus et entre les espèces.

Les espaces des déplacements

Les déplacements des animaux sont en relation avec leur espace environnant. La mise en relation entre espace et localisations permet d'étudier plusieurs aspects des comportements spatiaux de la faune. L'espace occupé peut être étudié du point de vue de la présence des individus qui occupent une zone déterminée. L'utilisation de l'espace se réfère aussi aux déplacements et aux caractéristiques des chemins empruntés par les individus.

- L'occupation de l'espace

Du point de vue de l'occupation de l'espace, la zone de vie d'un individu est définie par son emprise ou délimitation, sa superficie, les éléments du paysage qui y sont présents. Pour comprendre les déterminants de choix de la zone habitée, on cherche à caractériser cette zone en termes de ressources, de composition paysagère et de populations. Certains facteurs peuvent limiter la présence d'une ou plusieurs espèces comme un microclimat non favorable, le pourcentage de couvert forestier, le relief. La démarche consiste souvent à comparer les caractéristiques de l'espace occupé avec celles du voisinage non fréquenté. Des hypothèses sur un comportement spatial électif peuvent alors être formulées. La Figure I.11.a illustre l'estimation des domaines vitaux à partir de localisations connues de quelques individus d'une population d'oiseaux de l'espèce gélinotte des bois (*Bonasa bonasia*). Cette approximation de l'occupation de l'espace par année ou sur plusieurs années est effectuée par calcul de l'enveloppe convexe minimale, d'abréviation commune « MCP » pour *minimum convex polygon*. Ce domaine vital représente l'espace dans lequel vit et se déplace un individu (Hamann *et al.*, 2003 ; Steiniger & Hunter, 2013). Il est supposé satisfaire les besoins des animaux en habitat (ressources) et en échanges sociaux. Pour couvrir l'ensemble des cycles biologiques, le suivi dans le temps des domaines vitaux est nécessaire : sur une année entière pour évaluer les déplacements et migrations saisonnières, sur plusieurs années afin de visualiser les déplacements uniques tels les dispersions juvéniles ou les migrations définitives dues à des modifications du milieu. D'autres méthodes d'interpolation d'estimation des domaines vitaux peuvent être utilisées. Par exemple, l'interpolation par noyaux, également nommée par Kernel, donne une surface d'occupation spatiale précisée selon la probabilité de présence, telle illustré en Figure I.11.b. Elle est plus riche que l'enveloppe convexe minimale car elle intègre la densité des localisations, mais elle dépend d'un paramétrage s'appuyant sur des hypothèses.

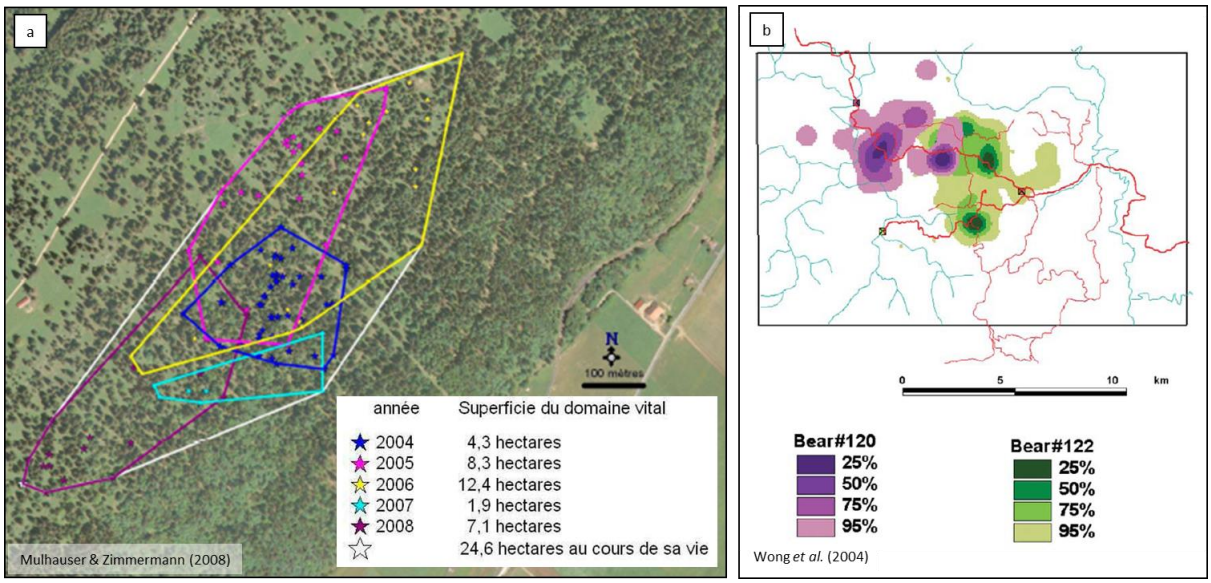


Figure I.11. Méthodes d'interpolation spatiale du domaine vital. a) Estimation du domaine vital d'une gélinotte des bois par la méthode du polygone convexe minimum, en blanc pour 5 ans et une couleur par année (Mulhauser & Zimmermann, 2008). Le domaine vital s'élargit et se déplace au cours des ans, tout en restant situé dans le même type d'habitat favorable à altitude similaire et avec un même type de couvert forestier. b) Domaines vitaux de deux ours malais (*Helarctos malayanus*) estimés par la méthode des noyaux (Wong *et al.*, 2004) : ceux-ci se superposent un peu même si les individus n'ont jamais été observés à moins de 1,5 km.

La détermination et la caractérisation des domaines vitaux sont étudiées de façon classique lors des études sur la sélection de l'habitat par les espèces. L'évolution des domaines vitaux est

également utilisée comme indicatrice des réponses des animaux aux modifications de l'environnement : élargissement du domaine vital impliquant des déplacements plus longs, migration définitive vers un nouveau domaine, diminution de la densité d'une population occupant un même espace (Degregorio *et al.*, 2011 ; Netzer *et al.*, 2007).

- Les chemins empruntés lors des déplacements

L'objectif est de comprendre par où passent les animaux et quels sont les caractères de l'espace utilisés lors des déplacements. L'analyse des déplacements s'effectue généralement à une échelle temporelle plus fine que celle des domaines vitaux. Il s'agit souvent d'identifier les zones où les animaux restent plus longtemps, ce qui traduit leur attrait. Cette préférence peut par exemple se recouper avec les aires associées à des probabilités de présence élevées, estimées par la méthode des noyaux. Il peut également s'agir de déterminer les éléments géographiques qui influencent les déplacements. Ces éléments du paysage peuvent varier selon la saisonnalité ou l'alternance entre le jour et la nuit. Par exemple, Náhlik *et al.* (2009) montrent que les cerfs (*Cervus elaphus*) ont des déplacements différents le jour et la nuit. Les zones forestières sont très utilisées le jour alors que les milieux ouverts sont traversés et exploités pendant la nuit. L'évolution des déplacements peut dépendre de la saison. Les pécaris (*Tayassu pecari*), assimilés à des cochons sauvages d'Amérique, adaptent leurs déplacements en fonction de la saison, vers des lieux abondants en ressources alimentaires fruitières (Carrillo *et al.*, 2002). De manière générale, les déplacements dans les domaines vitaux traduisent les pratiques habituelles d'utilisation de l'espace. Selon le type de milieu occupé par les espèces, les déplacements permettent de différencier les zones réunissant les conditions de vie nécessaire pour les animaux, et les lieux uniquement empruntés pour des trajets. Dans la thèse de Pereboom (2006), les déplacements des martres des pins (*Martes martes*) sont étudiés dans un milieu fragmenté. Les trajets sont mis en corrélation avec le type de milieu, ouvert ou fermé. Selon la présence ou la proximité des individus dans les différents types de couvert forestier, on en déduit le type d'utilisation de l'espace : excursion, transit, exploitation. L'espace parcouru lors des déplacements est soit traversé dans le seul but d'atteindre une zone d'intérêt, soit exploité pour sa nature et sa contenance en ressources.

Les types de déplacements

Les déplacements traduisent les différentes activités de la faune. Ils se distinguent par leurs motivations qui sont liées aux cycles biologiques et se répercutent sur l'espace. Ils se révèlent ainsi de natures diverses.

- Les déplacements « quotidiens » répondent à des besoins journaliers. Selon les espèces et les milieux dans lesquels elles vivent, les motivations concernent la recherche de nourriture ou d'eau, l'accès à des terrains de chasse ou de ressources, le changement entre gîtes de repos ou zones de refuge. Certains de ces déplacements peuvent être exploratoires. L'animal ne connaît a priori pas l'espace qu'il explore. Il se déplace pour trouver de nouvelles ressources.
- Les déplacements peuvent être dus à des évènements exogènes brefs : fuite en réponse à un dérangement – présence humaine ou animale non habituelle, bruit –, fuite face à un prédateur ou à un comportement offensif.
- Les déplacements de migration peuvent être la réponse à des modifications de conditions environnementales. Les migrations saisonnières peuvent être calées sur la phénologie des plantes. Ils peuvent être motivés par des changements dans le milieu habité, dus aux régimes saisonniers de disponibilité des ressources alimentaires. Des migrations peuvent ne pas être incluses dans les rythmes de vie habituels des espèces. Elles peuvent être provoquées par des modifications du paysage. Les évolutions des milieux peuvent

engendrer des manques dans l'apport en ressources et en lieux de vie nécessaires aux animaux. Ces évolutions peuvent faire suite à des évènements climatiques ou terrestres exceptionnels, à des constructions ou à des aménagements d'origine anthropique. De manière générale, le bouleversement d'un écosystème perturbe les réseaux trophiques entraînant soit une adaptation des individus dans l'espace modifié soit leur départ.

- Les déplacements de migration correspondant à une partie du cycle biologique des animaux peuvent être temporaires ou définitifs. Par exemple, certaines espèces migrent à la recherche d'un partenaire lors de la période de reproduction. Les animaux reviennent ensuite généralement dans leur domaine vital habituel. Les déplacements de dispersion juvénile sont réalisés par des jeunes cherchant un nouveau domaine vital. Ils respectent des schémas variés, comme le montre l'exemple des juvéniles des lièvres d'Europe (*Lepus europaeus*) illustré en Figure I.12 (Bray *et al.*, 2007). Les individus s'éloignent plus ou moins de la zone où ils ont été élevés, et en une ou plusieurs étapes.

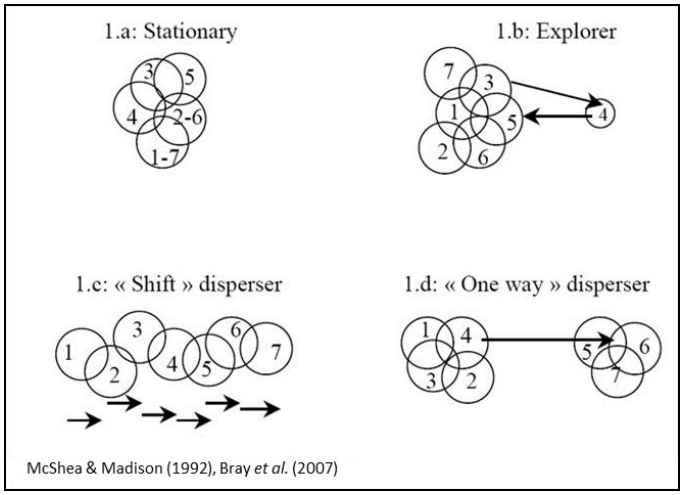


Figure I.12. Schémas des domaines vitaux (numérotés) évoluant dans le temps et des déplacements (flèches) chez le lièvre d'Europe (*Lepus europaeus*) d'après McShea & Madison (1992) et Bray *et al.* (2007). Quatre types, a : « stationnaire », b : « exploratoire », c : « glissant », d : « dispersion sans retour ».

L'étude des déplacements s'effectue à partir de données dont les techniques d'acquisition sont décrites en I-2.1.3. Les trajectoires reconstruites à partir de ces données permettent d'approcher les trajets réels et d'analyser les déplacements selon des niveaux de détails spatiaux et temporels différents. Les analyses peuvent porter sur des déplacements connus grâce à des pas de temps plus ou moins longs. Les types de déplacements peuvent s'identifier à partir des distances parcourues, de l'étendue de la zone fréquentée, du rythme selon la répartition des vitesses. Dans Fryxell *et al.* (2008), les déplacements des wapitis du Manitoba (*Cervus elaphus manitobensis*) sont analysés suite à la réintroduction d'une harde en Ontario et selon trois échelles de déplacements. À pas de temps importants et sur plusieurs années, des mouvements bi-phasiques sont mis en évidence : les déplacements individuels se confondent avec ceux du groupe et correspondent à l'utilisation d'un espace familier et à l'exploration. À pas de temps intermédiaire, de l'ordre du mois, les déplacements semblent influencés par les autres wapitis du groupe et par la localisation des ressources. Enfin, à un niveau de détail spatio-temporel fin, les déplacements apparaissent comme une réponse comportementale aux ressources locales ; l'alternance entre les déplacements de recherche de nourriture et les repos suit la répartition spatiale des ressources.

Les différents types de déplacements correspondent à des pas de temps différents et impliquent des individus ou des populations. Comme illustré en Figure I.13, les déplacements quotidiens des

individus peuvent faire évoluer à long terme l'aire biogéographique d'une espèce. Ce principe correspond à la théorie de la hiérarchie (Allen et Starr, 1982, dans Burel & Baudry, 1999). Les vitesses de fonctionnement et d'évolution des écosystèmes se hiérarchisent selon des pas de temps variés. Elles impliquent plusieurs entités et recouvrent des superficies adéquates aux processus écologiques.

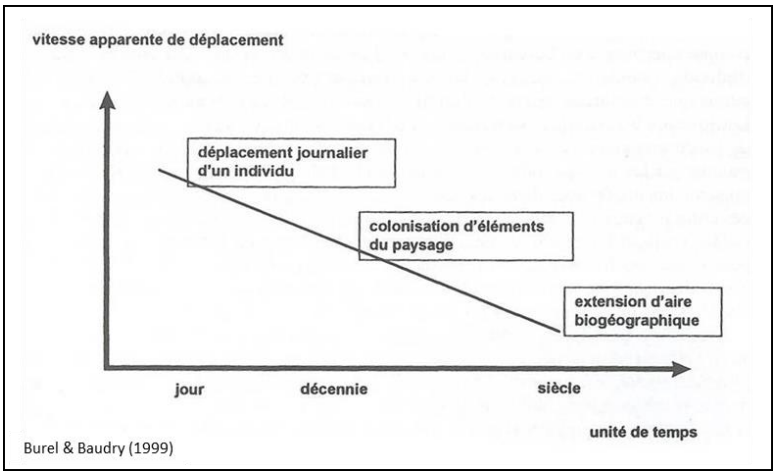


Figure I.13. Des déplacements individuels journaliers à la distribution des espèces animales (Burel & Baudry, 1999).

Dans le cadre de notre sujet, nous définissons dans le chapitre II les échantillons étudiés, les espaces et les types de déplacements concernés.

2.1.2. Connaître les déplacements pour mieux aménager le territoire

Les connaissances des déplacements de la faune aident à mieux comprendre l'utilisation de l'espace. Cette utilisation se rapporte aux conditions de vie des espèces et informe sur leurs besoins. L'intégration de comportements spatiaux connus est pertinente pour évaluer les effets futurs des modifications du paysage dues à une action directe ou indirecte de l'homme. Nous regroupons sous l'expression comportements spatiaux, les comportements des animaux impliquant directement l'espace, comme la sélection du domaine vital, l'exploitation de ressources ou l'influence des éléments du paysage sur les déplacements. L'assimilation des connaissances peut permettre de les prendre en compte lors d'aménagements et lors de nouvelles constructions afin de minimiser l'impact négatif de celles-ci. Nous avons vu que selon les espèces, des préférences au niveau de l'habitat peuvent être identifiées. Des préférences peuvent également être perçues selon les caractéristiques des individus – âge, santé – ou selon les particularités du site. La densité et l'importance des obstacles aux déplacements, leur dangerosité, la fragmentation des habitats, l'emplacement des lieux contenant des ressources sont autant de paramètres évalués dans le but de comprendre les déplacements. Ces différentes connaissances sont intéressantes à intégrer lors des projets d'aménagement du territoire.

Nous présentons quelques études issues de la littérature qui illustrent la variabilité des comportements spatiaux des animaux selon les espèces et selon les espaces. Ces études montrent l'intérêt potentiel à connaître ces comportements afin d'aménager le territoire en préservant la faune sauvage.
Pour une même espèce, l'utilisation de l'habitat peut différer selon les caractères de l'espace de vie. Dans Saïd *et al.* (2009), la taille et la composition de plusieurs femelles de chevreuil sont examinées. Deux stratégies sont identifiées selon les individus : de grands domaines vitaux avec

des ressources de faible qualité, et des domaines vitaux restreints correspondants à des habitats de qualité élevée. On peut également comparer, entre deux ou plusieurs espèces, les caractères des espaces agissant sur leurs déplacements. Certaines études montrent que l'influence de la présence humaine et de ses conséquences sur les paysages diffèrent selon les espèces. Torres *et al.* (2011) ont étudié les différentes influences des activités humaines – par les infrastructures, le bâti et la végétation – sur les chevreuils et les élans dans le sud de la Norvège. Les deux espèces semblent s'accommoder des dérangements. Cependant, les chevreuils s'adaptent mieux à la proximité des zones urbaines, à condition que soient présentes des essences végétales intéressantes.

Les déplacements traduisent les préférences et les capacités des espèces. Par exemple, les chevreuils, plus sélectifs au niveau des ressources, se déplaceront plus vite et sur de plus grandes distances que le chamois (*Rupicapra rupicapra*) ou le mouflon (*Ovis gmelini*), comme dans Tablado *et al.* (2010). Les déplacements illustrent ainsi les besoins en superficie et en richesse des habitats relatifs aux espèces. Plusieurs espèces sur un même espace peuvent être en compétition en exploitant les mêmes ressources ou les mêmes lieux. Elles peuvent également être liées par une relation d'interdépendance proie-prédateur qui régule les populations et qui conditionne la présence des espèces dans un espace. La prise en compte du fonctionnement des écosystèmes devrait être idéalement la plus complète possible afin de préserver la biodiversité, même si les études sont complexes et coûteuses.

Nous pensons que les connaissances acquises sur l'influence du paysage sur les déplacements de la faune constituent un élément exploitable lors de projets d'aménagement. Les conséquences de modifications spatiales sur la faune sont souvent inhérentes à la configuration du paysage dans la zone concernée par les aménagements. Cependant, les études des conséquences sur la faune en amont peuvent être complétées par des observations postérieures aux aménagements. Les mesures compensatoires, comme les passages à faune, sont possiblement mises en place en fonction des observations et des analyses des déplacements.

2.1.3. Les méthodes de suivis des déplacements d'animaux

Les suivis des déplacements de la faune sont réalisés grâce à diverses techniques. La notion de déplacement implique de détecter la position d'un même individu à au moins deux moments distincts. Le nombre et la fréquence temporelle des relevés d'un même individu sont déterminants dans l'analyse de ses déplacements et de son occupation de l'espace. L'étude de déplacements de dispersion n'exige que deux positions. Le résultat est ainsi une matrice origine-destination des individus entre leurs lieux de vie initiaux et leurs nouveaux territoires. En revanche, pour étudier l'étendue des déplacements et estimer la taille des domaines vitaux, plusieurs positions enregistrées dans le temps sont indispensables. Le nombre de localisations améliore généralement la précision de l'évaluation de cette aire d'activités journalières. Néanmoins, un nombre restreint d'enregistrements peut être suffisant si le protocole d'échantillonnage et la méthode d'estimation sont adaptés. Par exemple, Börger *et al.* (2006) réalisent une interpolation par noyaux avec seulement 10 positions sur plusieurs jours pendant un mois. Les différences entre les domaines vitaux estimés reposent sur les variations entre les individus suivis et entre les sites d'étude. Plus la fréquence des positions enregistrées augmente, plus la connaissance de l'utilisation de l'espace par un animal est précise. Des intervalles temporels courts permettent des interpolations de trajectoires pertinentes. Les déplacements peuvent alors être caractérisés par leur rythme et par rapport aux éléments du paysage. La fréquence et la précision des localisations dépendent des protocoles et des techniques de suivi.

Certaines techniques de collecte des localisations de la faune ne nécessitent aucun matériel de suivi. Elles se déroulent uniquement par observation directe des animaux ou par observation indirecte des indices de présence tels des poils ou des fèces. Ces observations représentent une difficulté dans l'identification individuelle mais elles permettent une connaissance du contexte de la position relevée. D'autres techniques nécessitent un matériel spécifique. Les équipements sont soit posés sur les animaux tels les marques ou les appareils électroniques, soit statiques pour des relevés à un même endroit, par exemple par des captures photographiques. Toutes les méthodes requièrent une présence du scientifique sur le terrain. Cette présence doit être permanente ou temporaire lorsqu'une récupération postérieure des enregistrements des positions est possible. Les différences entre ces techniques résident dans :

- le temps passé sur le terrain et le nombre de personnes requises ;
- le coût de mise en œuvre dont celui du matériel ;
- la précision spatiale des coordonnées des positions des animaux, planaires et altimétriques ;
- la fréquence temporelle possible entre les positions ;
- la durée totale du suivi.

Le choix de la méthode dépend des individus et de l'espèce suivie. En effet, certaines techniques de suivi sont dépendantes de la taille et du poids des animaux. Une liste non exhaustive des méthodes de suivi des déplacements est énoncée ci-dessous, accompagnée d'exemples et de commentaires sur les avantages et les inconvénients de chacune.

Les méthodes de télémétrie

La télémétrie réunit les méthodes de suivi à distance à l'aide d'appareils placés sur les animaux. Selon les techniques, des installations complémentaires sont requises. C'est cette méthode qui a été utilisée pour récolter les données de notre étude.

- Le radiopistage

Le radiopistage fonctionne à partir d'un système émetteur-récepteur à l'aide de signaux radio VHF *very high frequency*. L'émetteur est positionné sur l'animal en fonction de sa morphologie, collé directement ou maintenu par un collier. L'onde radio émise possède une fréquence définie par individu suivi. Une antenne réceptrice peut alors scanner l'espace selon une fréquence particulière. La direction du signal est ainsi notée. L'estimation par triangulation des coordonnées de l'animal nécessite le relevé de direction du signal par au moins deux antennes séparées par une distance connue et à des moments quasi simultanés. La précision des positions en (x, y) dépend de la qualité du signal : celle-ci diminue avec la distance entre l'émetteur et le récepteur. Un suivi trop rapproché peut toutefois déranger l'animal et influencer son déplacement.

La technique de radiométrie a été largement utilisée pour étudier les mouvements d'oiseaux et de poissons car elle permet d'enregistrer également des données environnementales comme la température, le vent, la pression. Par exemple, Baras (1995) a étudié les activités du barbeau commun (*Barbus barbus*) en fonction de l'heure de la journée et de la saison, tout en l'associant aux variables hydrologiques. Les vols migratoires de cigognes noires (*Ciconia nigra*) ont été suivis par cette technique à partir de deux antennes fixes (Parkes, 2003). Les déplacements de chauves-souris sont aussi étudiés par cette technique, notamment pour connaître la localisation des gîtes de repos et des terrains de chasse et pour caractériser leurs préférences paysagères lors des vols. Les déplacements sont estimés à partir d'enregistrements réguliers, comme dans le suivi de Parise *et al.* (2012) sur des pipistrelles de Nathusius (*Pipistrellus nathusii*), illustré en Figure I.14.a. Pour les mammifères se déplaçant au sol, le radiopistage a permis de suivre, entre autres, les mouvements de blaireaux (*Meles meles*) (Bodin, 2005), de lièvres (Bray *et al.*, 2004)

illustrés en Figure I.14.b, de sangliers (Tolon & Baubet, 2010), ainsi que de plusieurs individus de panthères des neiges (*Uncia unica*) (McCarthy *et al.*, 2005).

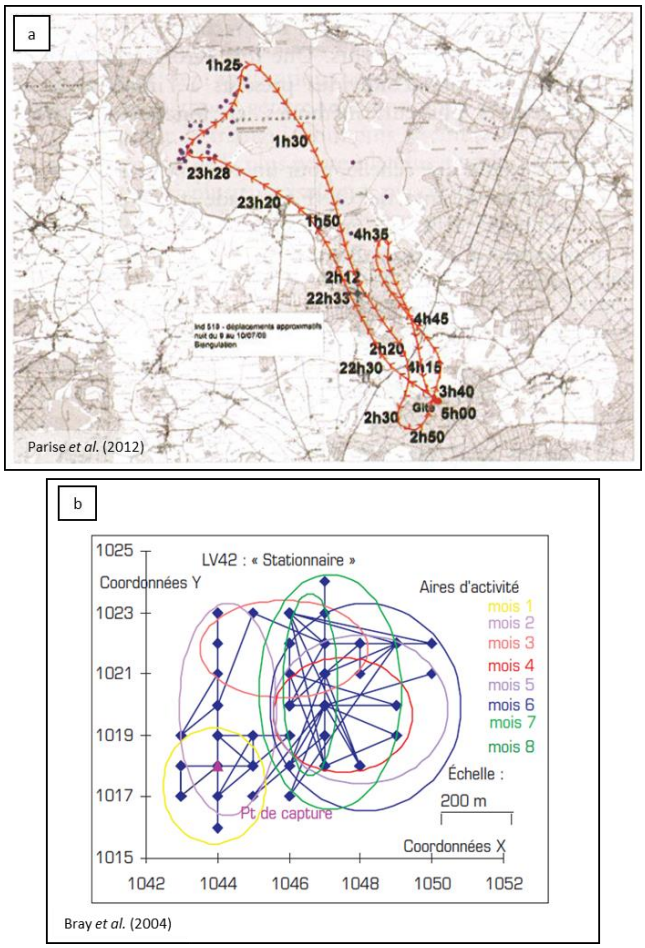


Figure I.14. a) Déplacements nocturnes estimés sur une espèce de chiroptères, la pipistrelle de Nathusius (Parise *et al.*, 2012). Des enregistrements réguliers sont indiqués par les horaires rapprochés. b) Positions (x, y) pour un lièvre d'Europe suivi pendant huit mois (Bray *et al.*, 2004). La superposition des aires d'activités traduit un modèle spatial de type stationnaire.

Le radiopistage permet le suivi à distance d'animaux et la récolte de positions successives à une fréquence plus ou moins grande selon les analyses souhaitées des déplacements et de l'occupation de l'espace. La principale limite est la ressource en temps et en personnes présentes sur le terrain. Concernant la précision des données, la détermination des coordonnées (x, y) à partir des relevés de direction peut être associée à un polygone d'erreur donnant une approximation de la localisation exacte, comme utilisé lors des suivis de chevreuils dans Pellerin (2005).

- Le GPS, *Global Positioning System*

Le GPS calcule et stocke les positions, contrairement aux systèmes VHF ou aux balises Argos qui elles aussi utilisent le positionnement par satellite. Les informations enregistrées sont au minimum les localisations en 3D (x, y, z) ainsi que le jour, l'heure et des indications sur l'enregistrement : qualité du signal, nombre de satellites. Des capteurs associés au système GPS peuvent enregistrées d'autres variables comme une estimation de la vitesse de mouvement, de l'activité – tête haute ou basse –, et des données se rapportant à l'environnement. Le matériel GPS pour le suivi d'animaux est miniaturisé. Il est souvent inclus dans des colliers. Le poids ne

doit pas dépasser en moyenne 5 % du poids de l'animal. La plus grande part du poids est à imputer aux batteries. Cette contrainte limite l'utilisation des colliers GPS car le poids minimal est d'environ 250 grammes en 2012. Pour des études pendant de longues périodes, un compromis doit être choisi entre la durée totale de suivi et la fréquence des relevés. Les plus petits animaux suivis par les colliers GPS sont des blaireaux et des renards (Robardet, 2007). Le stockage des informations nécessite la plupart du temps la récupération du collier afin d'accéder aux positions. Un système VHF est souvent associé au dispositif pour continuer à garder un signal et capturer à nouveau les individus. Certains systèmes permettent le transfert des informations sans liaison filaire, même s'ils consomment plus de batteries. Ils impliquent la mise en place d'un réseau d'antennes réceptrices de signaux radio, GSM (*global system for mobile communication*) ou satellites (Girard, 2005). Ces signaux permettent également l'estimation des localisations. La méthode est particulièrement intéressante pour le suivi de plusieurs espèces sur un même site car l'équipement de balise sur de petits animaux est possible, et l'association avec un GPS est réalisable sur des individus plus lourds (Markham & Wilkinson, 2008).
De nombreuses études utilisent à présent le GPS. L'exploitation de l'espace par les éléphants de savane d'Afrique (*Loxodonta africana*) est analysée selon la saison et selon l'heure de la journée grâce à des enregistrements de colliers GPS séparés par des intervalles de temps différents (Loarie *et al.*, 2009). Un échantillon des déplacements d'un éléphant selon l'heure de la journée est illustré en Figure I.15.

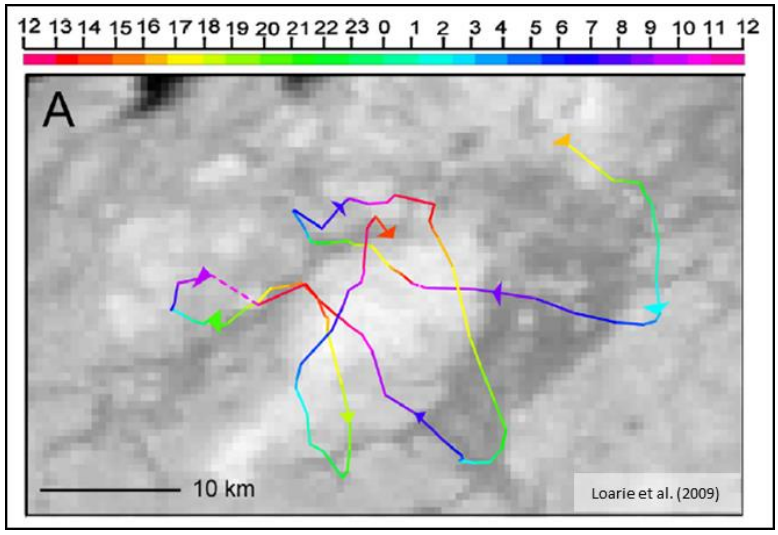


Figure I.15. Déplacements d'un éléphant dans le Parc National de Kafue en Zambie à partir de points récoltés par collier GPS. Étude pendant 5 jours, la couleur dépendant de l'heure de la journée. L'occupation du sol apparaît en noir pour l'eau, en gris foncé pour les zones humides et en gris clair pour un couvert boisé (Loarie *et al.*, 2009). Les déplacements sont sinueux ce qui montre que l'interpolation linéaire entre les points GPS sous-estime les vitesses de déplacements. Les mouvements les plus rectilignes semblent avoir lieu la nuit.

Dans cette figure, la précision des images satellites utilisées est plus petite que la moyenne des distances entre deux points GPS successifs et que l'erreur de positionnement. Cette adéquation permet d'étudier les rythmes de déplacements en fonction des variables environnementales. Girard *et al.* (2009) suivent de même par GPS, des bouquetins des Alpes (*Capra ibex ibex*) pendant une année afin de caractériser les déplacements journaliers et leur répartition spatiale selon les saisons.

La quantité de données récoltées est potentiellement importante. Le système autorise une pré-programmation des moments et des fréquences d'acquisition. Pour estimer des déplacements, le GPS se révèle un moyen performant. L'avantage par rapport au radiopistage est que la

présence sur le terrain n'est pas continue, elle est réduite à la pose et à la récolte de l'appareil sur les individus, ainsi qu'à des sorties de contrôle afin de vérifier la bonne condition des animaux et le bon fonctionnement des systèmes. La précision des coordonnées enregistrées par le GPS dépend de la qualité du signal. Celui-ci est fonction de plusieurs paramètres :

- de la qualité du capteur ;
- de la configuration de satellites ;
- de l'ouverture du milieu ;
- des conditions météorologiques comme la température extérieure et la pluviométrie.

Dans Servigne *et al.* (2007), les caractéristiques de plusieurs capteurs d'appareils de géolocalisation sont modélisées, par exemple par leur type de fonctionnement et la précision des données enregistrées. Le DOP, *Dilution Of Precision*, calculé par le GPS, est un indice général de la qualité du signal. Il prend en compte la répartition des satellites dans le ciel. Plus il est faible, plus la probabilité que les coordonnées soient précises est grande. Le DOP peut être vu comme une combinaison d'indices de la qualité des données, comme le PDOP, *Position Dilution Of Precision*, pour les coordonnées spatiales (x, y, z) et le TDOP, *Time Dilution Of Precision*, pour la date. Les échecs des enregistrements, c'est-à-dire les positions manquantes, peuvent aussi être corrélés avec le couvert forestier qui est lié aux activités des animaux (Bourgoin *et al.*, 2007). La Figure I.16 illustre cette relation. Le nombre de succès de localisations par collier GPS posé sur des mouflons méditerranéens (*Ovis gmelini musimon*) augmente avec le pourcentage de ciel visible.

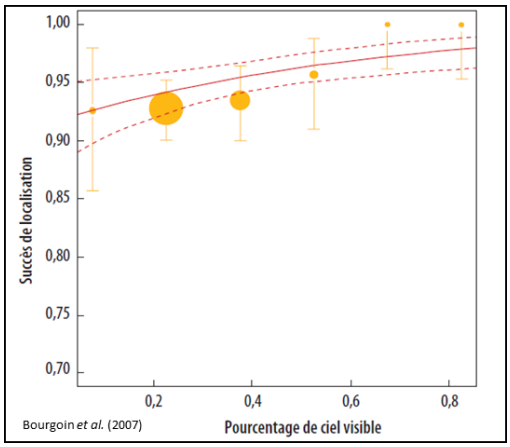


Figure I.16. Relation entre la proportion de ciel visible et le succès de localisation par des colliers GPS (marque Lotek 3300S). Résultats à partir du suivi de 13 femelles de mouflon dans le massif du Caroux-Espinouse dans l'Hérault entre 2003 et 2006. Le rayon des cercles est proportionnel au nombre de positions enregistrées. Les valeurs prédites par un modèle théorique suivent la ligne continue, les lignes pointillées sont les quantiles de 2,5 % et 97,5 % (Bourgoin *et al.*, 2007). Les faibles pourcentages de ciel visible entraînent une mauvaise réception des signaux des satellites par le collier GPS, ce qui diminue la précision des enregistrements.

D'autres études sur les causes de l'imprécision et de l'échec des enregistrements GPS montrent une relation avec le type de couvert forestier. Les résultats ont tendance à être moins bons en forêt avec une majorité de conifères, même si la variabilité des précisions reste grande quel que soit le type de forêt (Cargnelutti *et al.*, 2007). Les valeurs de DOP et de PDOP donnés par le GPS ne doivent donc pas être les seules à être prises en compte pour évaluer la qualité des positions (Stache *et al.*, 2012). Les déplacements rapides des animaux entraînent des positions généralement moins précises car le système doit calculer entre deux dates successives des positions éloignées. Une fréquence temporelle élevée des enregistrements GPS a une influence positive sur la précision des coordonnées car il y a plus de chances que les positions soient proches et que le calcul de leurs coordonnées soit plus rapide. Cela permet d'identifier aussi plus

facilement les coordonnées incohérentes (Cain III *et al.*, 2005). Pour améliorer la précision des données, une correction différentielle peut être appliquée. Elle s'appuie sur une station GPS fixe au sol. Jusqu'en 2000, cette correction servait principalement à améliorer la précision suite à la dégradation volontaire du signal par le Département de la Défense des États-Unis. Elle sert à présent à prendre en compte les imprécisions dues à des erreurs d'horloge ou au passage du signal dans les couches de l'atmosphère (Bourgoin, 2008).

Les autres techniques de suivi de faune et en particulier de leurs déplacements présentées succinctement ci-dessous n'ont pas été utilisées directement dans les cas d'étude de notre thèse. Elles sont néanmoins la base de nombreuses études sur l'influence du paysage sur les déplacements. Elles sont souvent recoupées avec les suivis par radiopistage et par GPS afin de compenser les limites de ces deux techniques : un site d'étude limité, un nombre restreint d'individus suivis, une autonomie de batterie relative.

- La balise Argos

Les balises Argos transmettent des signaux à des satellites dédiés, eux-mêmes les renvoyant à des antennes au sol. En France, ces signaux sont ensuite traités par le CNES (Centre national d'études spatiales). La restitution de la position des balises est exécutée à partir de l'analyse de l'effet Doppler. L'avantage par rapport aux suivis GPS sans transmission de données à distance est qu'il n'est pas nécessaire de récupérer les appareils pour charger les données. Le dispositif des balises Argos est utilisé pour les objets mobiles se déplaçant potentiellement sur de grandes distances et sur l'ensemble du globe y compris dans des zones peu accessibles. Des navires en sont équipés pouvant ainsi récolter des données sur les mers et océans. Avec la miniaturisation des balises, celles-ci peuvent être fixées sur de petits animaux. Les balises sont souvent utilisées pour suivre les oiseaux ainsi que les mammifères marins. La Figure I.17 est une carte représentant les déplacements estimés d'un albatros hurleur (*Diomedea exulans*) au sud de la Nouvelle-Zélande pendant deux semaines et à un rythme bihebdomadaire (Walker *et al.*, 1995). Cet oiseau de mer est connu pour réaliser de longs trajets en mer, ici jusqu'à 1500 km. La forme des déplacements interpolés permet de suggérer des activités : trajet direct de voyage vers un site par un vol rectiligne et recherche de nourriture par un vol plus sinueux.

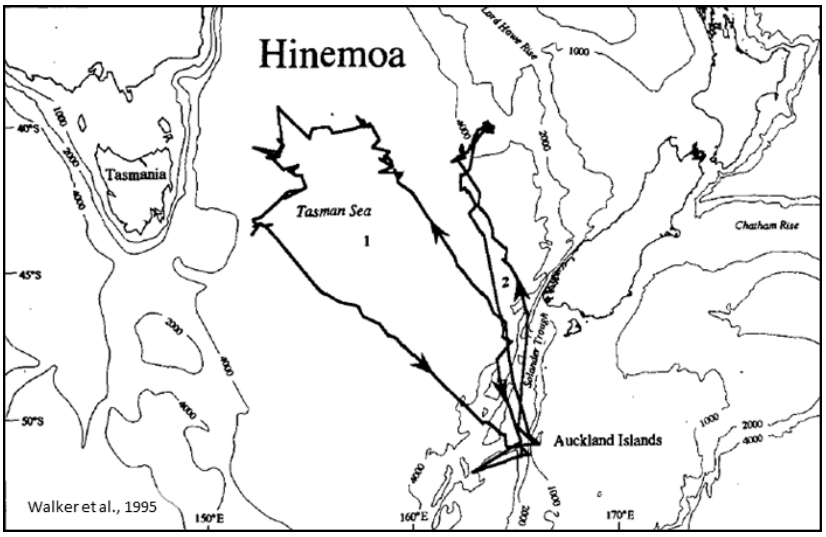


Figure I.17. Reconstruction à partir de localisations de balises Argos de deux vols d'un albatros hurleur nommé Hinemoa partant des Iles Auckland. Vol n°1 effectué entre le 2 et 15 février 1994, vol n°2 effectué entre le 1er et 13 mars 1994 (Walker *et al.*, 1995). Les oiseaux s'éloignent plusieurs jours au large à la recherche de nourriture.

Le système de balises Argos fait l'objet d'un programme commun CNES et CNRS (Centre national de la recherche scientifique) pour le suivi des animaux vivant sous les hautes latitudes, c'est-à-dire près des cercles polaires (CNRS, 2007). Les positions des balises Argos sont mises en ligne et cartographiées, ainsi que les variables environnementales, visualisées en Figure I.18. La connaissance contribue à une meilleure compréhension et prévision du changement climatique.

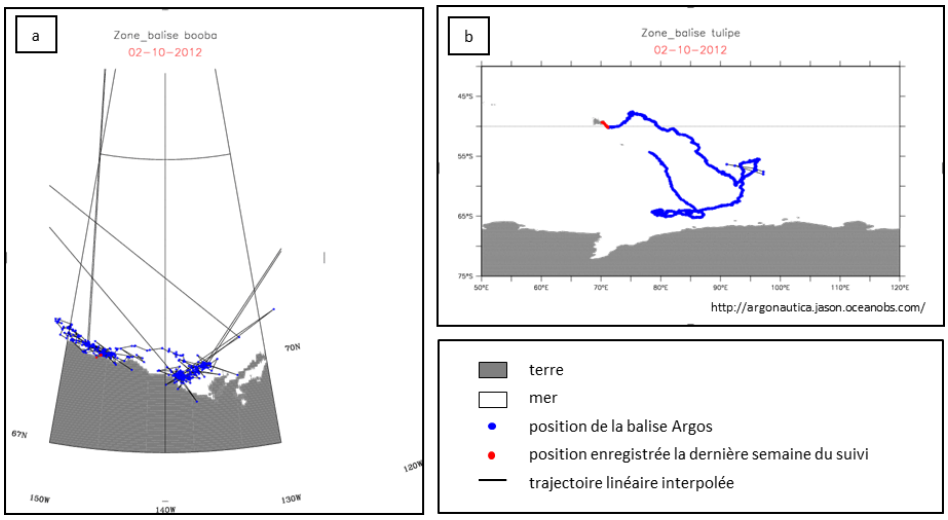


Figure I.18. Positions enregistrées par balise Argos du 22 mai au 2 octobre 2012, a) d'un ours polaire en Alaska, b) d'une éléphante de mer en Antarctique. Données en ligne sur [http://argonautica.jason.oceanobs.com/]. L'ours se déplace principalement à proximité de la côte de terre ferme sur la banquise ou dans l'eau. L'éléphante de mer se déplace au large des côtes pour chasser en pleine mer.

Comme pour le GPS, la condition pour utiliser la balise est que son poids soit inférieur à 5 % du poids de l'animal. Les localisations relevées n'échappent pas aux problèmes d'erreur, d'imprécision et d'échec, décrits précédemment pour le système GPS survenant lors de la transmission du signal aux satellites.

Les autres méthodes de suivis

Les méthodes de télémétrie sont complétées par d'autres types de suivis. Les méthodes énumérées ci-dessous permettent d'acquérir une connaissance des déplacements moins précise qu'avec les appareils de télémétrie. Elles permettent cependant d'évaluer les distances parcourues et l'étendue des espaces de vie des animaux.

- Les suivis visuels directs

Les déplacements des animaux peuvent être étudiés par des observations visuelles directes soit de visu soit à l'aide d'appareils photographiques ou de vidéo. Pour ces observations visuelles directes, l'étude des déplacements des animaux est aidée par le marquage : pour les oiseaux par exemple, le bagage est pratiqué. Il peut également s'agir de marques de couleur sur les insectes ou les petits animaux. Par ailleurs, les protocoles de radiopistage sont souvent accompagnés de poses de marques de couleur afin de rendre possible une identification visuelle directe individuelle lors des vérifications sur le terrain. Les observations sont intéressantes pour étudier les migrations : individuellement par le relevé de la marque, ou ramenées à l'espèce pour connaître le rythme des migrations. Un avantage de la méthode visuelle est que les observations peuvent être contextualisées : des relevés sur l'environnement peuvent être effectués simultanément à l'observation des animaux. Les observations visuelles permettent en plus d'étudier des comportements particuliers. Par exemple l'étude des comportements de vigilance

chez les chevreuils dans Benhaiem *et al.* (2008) est réalisée par observation directe et par enregistrement vidéo.
Les pièges photographiques ou vidéo sont utilisés pour détecter la présence d'animaux à des endroits stratégiques quelle que soit l'heure de la journée (Scheik & Jones, 1999). Il est possible d'en déduire des comportements de déplacements et d'utilisation de l'espace selon le réseau et le nombre de pièges installés, même si l'identification individuelle est délicate (Oliveira-Santos *et al.*, 2009). D'autres observations peuvent concerner les animaux morts. Dans ce cas, l'estimation de la densité des animaux est souvent l'objectif de l'étude. Il peut aussi s'agir d'évaluer les effets des infrastructures de transport sur les traversées et la présence des animaux à proximité (Meunier *et al.*, 2000).

Des réseaux de recensement et de surveillance des espèces s'appuient sur les observations directes. Ces réseaux peuvent se concentrer sur une espèce emblématique : par exemple le loup (Duchamp *et al.*, 2004), ou le lynx (ONCFS, 2010). Certains bénéficient d'une plateforme collaborative comme celle mise en place à l'Inventaire National du Patrimoine Naturel à partir du site [http://inpn.mnhn.fr/]. D'autres plateformes sont ouvertes au grand public qui peut enrichir d'observations personnelles les cartographies de présence : le site [http://www.faune-paca.org/], et à l'étranger le site [http://sabap2.adu.org.za/].

- Les suivis visuels indirects

Les suivis des indices de présence renseignent sur les déplacements. Des relevés de traces révèlent les chemins utilisés par les animaux, par exemple dans la neige (Paquet & Callaghan, 1996). Pour des suivis de déplacements à des endroits précis, des pièges à empreintes sont utilisés, même s'il reste difficile d'identifier les individus. D'autres indices de présence peuvent concerner des reliefs de repas ou une végétation abîmée par le passage d'animaux. Le relevé de l'emplacement des terriers est par exemple employé pour suivre l'évolution de l'occupation de l'espace par le grand hamster (*Cricetus cricetus*) en Alsace. L'interface de visualisation CARMEN (CARtographie du Ministère chargé de l'Environnement) rend compte de ce suivi, illustrée en Figure I.19.

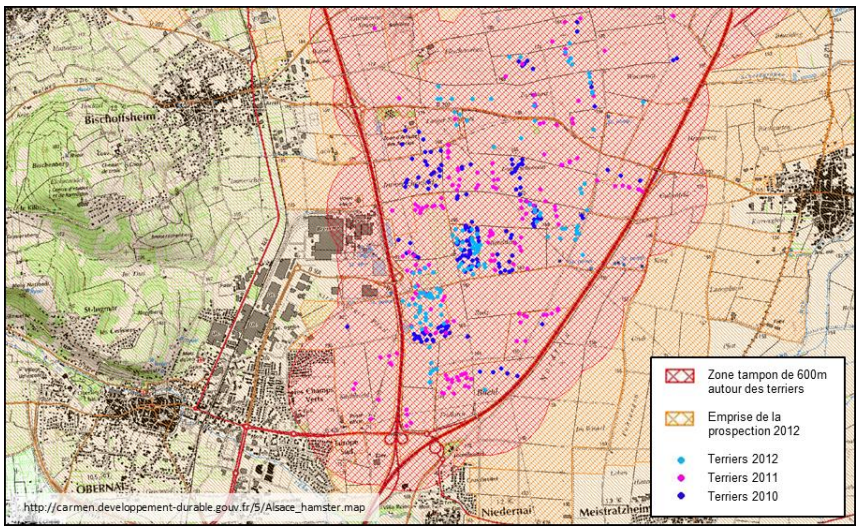


Figure I.19. Localisations des terriers du grand hamster, une couleur représentant une année. Données de la DREAL Alsace en ligne sur le site de cartographie interactive CARMEN [http://carmen.developpement-durable.gouv.fr/]. Entre 2010 et 2012, le nombre de terriers recensés a diminué et certaines parcelles ont été désertées.

- Méthodes CMR : capture-marquage-recapture

Le suivi par CMR est employé pour des espèces pour lesquelles il demeure difficile de déployer des suivis télémétriques, notamment à cause du poids. Cette méthode permet d'évaluer les éléments du paysage constituant des barrières ou qui sont favorables aux déplacements, comme chez les petits mammifères (Rico *et al.*, 2007). Le problème de la capture reste similaire aux méthodes de télémétrie. La capture peut s'avérer difficile car elle implique une présence fréquente sur le terrain. L'échantillon suivi est également soumis à des problèmes de représentativité des individus capturés par rapport à l'ensemble d'une population (Lee, 1997 ; Soisalo & Cavalcanti, 2006).

- Les analyses génétiques

Dans ces analyses, la distance génétique est analysée entre les individus. Elle reflète les liens de parenté et permet de mettre en évidence des groupes d'individus proches génétiquement. Elle peut a contrario servir à différencier des populations. Cette différence est ensuite à corréler avec d'autres paramètres : distance euclidienne entre les individus, caractérisation de l'espace, présence de barrières paysagères (Cosson *et al.*, 2006 ; Stevens *et al.*, 2006). Pour l'appréhension de l'espace par les animaux, la distance génétique peut se révéler utile pour vérifier des hypothèses sur la connectivité fonctionnelle des paysages.

2.1.4. Les données géographiques utilisées pour étudier les variables environnementales

Pour étudier l'influence du paysage sur les déplacements, il faut observer l'espace. La cohérence entre le niveau de précision des données de déplacements et des données sur l'espace est essentielle. Des cartes et des bases de données géographiques existent et s'attachent à décrire l'espace. Elles sont de précision variable et couvrent des étendue diverses, d'une zone restreinte à l'ensemble du globe. Les moyens pour produire ces données sont des observations directes sur le terrain ou indirectes via des photographies aériennes par exemple. La modélisation et la représentation de l'espace dans les bases de données géographiques doivent être adaptées selon l'objectif de l'étude. La description de l'espace peut être plus ou moins agrégée, du point de vue des informations géométriques et attributaires.
La végétation est une composante importante du paysage dans les études sur les animaux car elle représente des lieux d'habitat privilégiés et, pour certains, une ressource. Des relevés sur le terrain peuvent être effectués à partir de transects. Il s'agit d'une méthode de relevés le long d'une ligne virtuelle permettant de recenser les espèces végétales ou à un niveau plus agrégé les occupations du sol. La méthode des quadrats est aussi largement utilisée. Elle est réalisée à partir d'une analyse de surfaces égales réparties aléatoirement. La couverture végétale et la présence des espèces végétales sont ainsi estimées. Il est à noter que ces méthodes sont également employées lors de comptages d'animaux, afin d'évaluer leur densité et la présence des espèces (Varaillon, 1998).
Pour une cartographie exhaustive de l'espace, la résolution des informations doit être adaptée à celle des informations sur les déplacements. Une représentation de l'espace découpé selon une grille est créée dans Bautista *et al.* (2004). Elle est utilisée pour évaluer les distances entre les rapaces et les routes. Pour des sites plus étendus, l'utilisation d'images aériennes et satellites est fréquente (Olsvig-Whittaker *et al.*, 2013). Les traitements de télédétection permettent de réaliser des classifications d'occupation du sol. Des points de contrôle peuvent améliorer la classification en précisant la nature réelle du sol en des endroits précis. Les images satellites sont par ailleurs intéressantes car certaines sont diffusées plusieurs fois par an, ce qui permet de

prendre en compte les changements de phénologie et de constater des modifications spatiales dues par exemple à des aménagements.
L'étude des variables environnementales en relation avec les déplacements est intéressante car elle permet de mettre en évidence les effets des structures de paysage. Ces variables sont souvent corrélées entre elles, comme des fonds de vallées réunissant des infrastructures de transport, des habitations et l'hydrographie. Les déplacements de la faune sont influencés par l'ensemble de ces éléments du paysage.

2.1.5. Les analyses des déplacements pour la compréhension de l'influence de l'espace

Déplacements et mobilité en géographie

L'analyse des déplacements est liée en géographie à celle de la mobilité. Le déplacement est une partie de la mobilité qui demeure un thème de recherche vaste de par sa nature variée et de par les objets d'étude. Le terme est lui-même polysémique car il concerne selon les domaines des échelles différentes d'espace et de temps. Nous parlons ici de mobilité spatiale, c'est-à-dire qui s'inscrit dans un espace géographique (Kaufmann, 2004). La mobilité est qualifiée selon la temporalité des déplacements et selon les lieux concernés. Cette temporalité peut être longue ou courte. Les déplacements peuvent avoir lieu dans l'espace de vie habituel ou en dehors. La nature de la mobilité est liée à l'objet qui se déplace. Il peut s'agir d'individus qui sont les entités d'étude, ou à un niveau plus agrégé de populations. Il est question de flux lorsque les mouvements concernent plusieurs entités. Les flux sont humains ou matériels, associés ou non à des moyens de transport : transports de marchandises, mouvements migratoires, déplacements quotidiens. Les flux immatériels tels des informations ou des capitaux s'insèrent de même dans l'étude des mobilités. Ces derniers ont des conséquences sur les déplacements des individus.
En géographie, les problématiques concernant les déplacements et plus généralement la mobilité sont principalement centrées autour des hommes et des sociétés (Bonerandi, 2004). Cependant, les éléments étudiés – entités se déplaçant, types de déplacement, espace – et les méthodes d'analyse présentent des analogies avec celles des déplacements d'animaux. Nous retrouvons des concepts et des interrogations similaires entre la mobilité humaine et la mobilité animale. Les considérations touchent aux rythmes des déplacements, aux motivations et aux activités qui leur sont associées ainsi qu'aux interactions avec l'espace. Nous présentons quelques concepts et études concernant les déplacements humains pouvant être exploités lors de l'analyse des déplacements de la faune.

L'étude des déplacements humains en géographie s'attache à considérer l'espace qui joue un rôle de variable explicative. Cet espace peut être réinterprété au regard de pratiques individuelles : lieux de domicile, de travail, de loisirs. La mobilité à l'intérieur et à proximité des zones urbaines fait l'objet de nombreuses analyses. Dans Beaude & Guillemot (2012), les déplacements pendulaires, entre les lieux d'habitation et les lieux de travail, sont étudiés en prenant en compte les réseaux de transports empruntés et les temps de trajets qui dépendent du mode de locomotion et de l'heure de la journée. Dans Tabaka (2009), la mobilité quotidienne des habitants de la région grenobloise est étudiée. Dans ce cadre, les variables géographiques ainsi que sociologiques sont analysées afin de caractériser les mobilités. L'espace est lu à travers des comportements individuels récoltés par des enquêtes ménages déplacements, notamment conduites par l'INSEE. Les flux quotidiens de population autour des agglomérations suscitent des recherches pour les caractériser et appellent à considérer des choix sur les échelles spatio-temporelles. Une approche ascendante peut être utilisée pour étudier les phénomènes des flux. Les comportements propres aux individus sont additionnés dans un but d'émergence de dynamiques au niveau de la population. Le projet MIRO (2006), Modélisation intra-urbaine des

rythmes quotidiens, vise à déterminer les effets d'activités individuelles sur le fonctionnement de l'espace urbain à un niveau collectif. Cette approche individu-centré repose sur une typologie des types de déplacements via la détermination de profils sociodémographiques. Des déplacements fictifs sont dans ce projet générés par une approche agent. La modulation des emplois du temps associés à un grand nombre d'agents est par la suite testée et reliée à des dynamiques spatiales urbaines.

La time-géographie est une approche d'analyse de la mobilité qui met en avant les aspects temporels. Cette méthode a été initiée par Hägerstrand (1970) afin d'étudier les mouvements de migrations des populations humaines. Il a proposé une analyse en considérant les profils de déplacements individuels et en intégrant le rythme de ces déplacements. Ces analyses sont associées à une visualisation des trajectoires grâce à des prismes en trois dimensions. La notion de trajectoires spatio-temporelles est représentée par ses coordonnées planaires et par le temps en axe vertical. La Figure I.20 montre le système de référence consistant en un « cube » dans lequel est dessinée une trajectoire. Plusieurs auteurs ont repris cette représentation pour étudier les dynamiques des déplacements d'individus et de groupes d'individus (Huisman & Forer, 1998 ; Kraak, 2003 ; Miller, 2005).

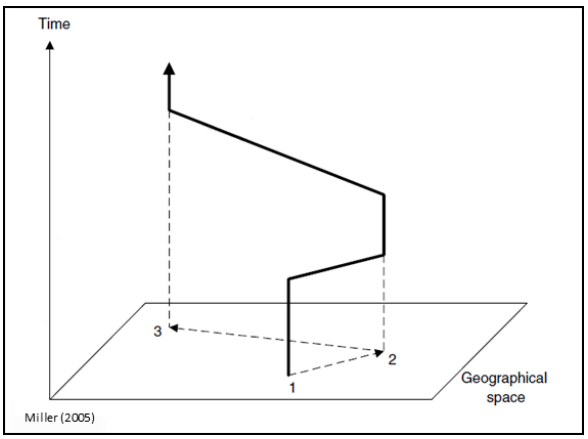


Figure I.20. Cube spatio-temporel. Les segments verticaux correspondent à des activités dans un même lieu tandis que les segments obliques sont des déplacements (Miller, 2005).

En plus de l'approche individu-centré, cette visualisation facilite la caractérisation des activités car les lieux d'arrêts et les lieux de déplacements sont clairement identifiables. La représentation de plusieurs trajectoires dans un même diagramme met en évidence des regroupements ou des proximités dans les mêmes lieux d'activités. Des rencontres lors des déplacements peuvent ainsi être extraits d'après l'axe temporel pour des déplacements à un même moment. Ces superpositions peuvent ensuite être associées à des éléments de l'espace comme les réseaux de transports. La time-géographie représente un apport en termes de visualisation de l'influence des contraintes spatiales sur les déplacements en fonction de leurs rythmes. L'exploitation du temps sur l'axe vertical des coordonnées permet de détacher les trajectoires individuelles des données spatiales même si la trace du déplacement reste visible sur le plan (x, y). Une représentation de la forme du terrain ou des éléments du paysage ne masque plus les trajectoires et l'interprétation sur le choix des lieux de déplacements peut être facilitée (Kwan & Lee, 2003).
Des trajets communs empruntés par plusieurs entités ainsi qu'une caractérisation de l'espace à partir des rythmes des déplacements sont visualisables. Des profils des entités peuvent être établis en amont afin de déterminer des patrons de trajectoires, comme dans Thévenin *et al.* (2007). Dans cet article, les enquêtes ménages et déplacements servent à proposer une

classification des individus par profil d'activités. Ces profils sont associés à des types de trajectoires spatio-temporelles moyennes décomposées en déplacements et en activités dans des lieux fixes.
Dans les études d'accessibilité aux zones urbaines par les transports, l'organisation spatiale de la ville ainsi que son fonctionnement temporel – par exemple les heures d'ouverture des commerces – peuvent être intégrés même si la représentation tend à se complexifier. La vision décorrélée entre trajectoires et occupations du sol ne dispense pas de recourir à des analyses spatiales intégrant des informations supplémentaires sur les entités et l'espace (Neutens *et al.*, 2011). Par ailleurs, les interactions entre les individus qui se déplacent et leur co-influence sur les choix de destination et sur les trajets empruntés sont difficiles à visualiser et à identifier sur une carte. Les analyses de trajectoires font appel à plusieurs facteurs explicatifs, spatiaux ou non.

Les différences entre les études de déplacements par des hommes et par des animaux résident dans les connaissances des choix et des motivations formulés explicitement. La détection des rythmes de déplacements des personnes est en lien avec des activités connues en termes de lieux, de fréquence, de ressources engagées. L'analyse des déplacements révèlent les modes de vie (Chardonnel *et al.*, 2004). Les analyses sont bidirectionnelles car des comportements sont corrélés avec des déplacements. Dans Yuan (2010), des trajectoires sont analysées via le prisme de l'usage du téléphone portable. Les fortes contraintes spatio-temporelles ressortent : des différences de fréquence d'usage sont observées entre les jours de semaine et les weekends, entre les quartiers de la ville parcourus, entre les déplacements courts et longs. Concernant les déplacements d'animaux, la détection des rythmes et des activités est menée à partir de la forme des déplacements, des relations avec l'espace et des interactions sociales. Ces connaissances a priori sont intégrées lors des analyses. Néanmoins elles sont toutes issues d'observations et sont plus sujettes à l'interprétation que des informations obtenues par entretiens. Les entretiens permettent de préciser les études d'accessibilité. L'espace peut par exemple être qualifié selon des critères d'ergonomie. L'accessibilité au sens d'accès physique à un lieu est évaluée par le mode de déplacement, les informations d'indication, l'ambiance générale. Ces aspects peuvent être récoltés à l'aide de questionnaires auprès de piétons (CERTU, 2005). L'espace est subjectif selon les capacités individuelles.

L'espace perçu

L'espace est perçu différemment selon les individus. Pour les personnes, des obstacles peuvent apparaître suite à des handicaps ou en fonction du contexte de motivation et d'obligation. Des tendances générales dans les patrons de déplacements sont recherchées afin d'améliorer la mobilité et l'accessibilité à certains lieux et services pour le plus grand nombre. L'espace est de la même façon perçu différemment par les animaux. La perception varie entre les espèces car elles n'ont pas les mêmes caractéristiques physiques, comme la vision et la taille qui modifient le point de vue sur le voisinage spatial. De plus, elles ont des besoins contrastés en milieux de vie et en ressources. La perception évolue avec l'âge, la connaissance du terrain et les expériences accumulées qui conditionnent des comportements de réponse face à des lieux dangereux ou des zones de ressources. Chez les groupes des éléphants d'Afrique, la matriarche possède les connaissances les plus poussées sur les hiérarchies sociales et les lieux de ressources. C'est elle qui prend les décisions impliquant l'ensemble du troupeau pour les lieux de vie temporaires ou les déplacements coûteux en énergie vers une ressource nécessaire (Bradshaw, 2004). Si l'on fait abstraction des influences sociales sur la perception de l'environnement, l'appréhension de l'espace par les animaux demeure sous l'effet de paramètres tels que l'état individuel, l'urgence

de remplir un besoin, la soumission au rythme biologique, le contexte non paysager incluant des perturbations exogènes et les conditions météorologiques.

L'adéquation entre données et phénomènes étudiés

La recherche de relations entre les déplacements d'animaux et l'espace se heurte souvent à la problématique de l'adéquation entre les informations disponibles. Toute information est caractérisée par sa source, sa thématique et par sa traduction en données pérennes, organisées et exploitables. Le niveau de détail des données conditionne les échelles de représentation cartographique et les analyses des phénomènes.
Pour les déplacements humains, les zones d'intérêt et les zones de déplacement sont connues à une certaine échelle. Les lieux d'activités humaines sont connus a priori : habitation, lieux de travail ou de scolarisation, commerces. Les déplacements sont majoritairement contraints par les réseaux de transport adaptés au mode employé (AUCAME, 2008). Afin de comprendre la chronologie et de définir des patrons de trajectoires, des données sur l'espace sont exploitées : localisation et fonction des bâtiments, tracé du réseau viaire, desserte des transports en commun. Si l'étude de la mobilité se concentre par exemple sur l'utilisation du mobilier urbain, les éléments comme les bancs, les panneaux ou les poteaux devront être intégrés à la description de l'espace. Il s'agit d'adapter le niveau de détail des données géographiques aux dynamiques de déplacements.
La compréhension des déplacements d'animaux pose une question similaire. Les lieux d'intérêt pour la faune ne sont pas connus a priori et il faut des données géographiques à des niveaux de détail fins afin de les découvrir. Cependant les données sur les lieux d'habitat répondent généralement à de petites ou moyennes échelles. Il existe toujours une limite de précision spatiale et attributaire dans les bases de données géographiques de même que pour les données récoltées sur les déplacements. Les limites des données géographiques concernent le contenu des bases – exhaustivité des éléments du paysage –, ainsi que la précision géométrique, la modélisation et la mise à jour (Béguin & Pumain, 1994). Les limites des données sur les déplacements concernent également ces aspects : la fréquence des localisations et la précision de leur position.

Déplacement et espace

Le terme de mobilité signifie l'action de se déplacer mais implique également les conséquences qu'apportent ces déplacements. Le cas de la mobilité des flux immatériels montre que quelle que soit la nature des objets mobiles, leur circulation porte à conséquence. Par exemple, les communications via les réseaux sociaux peuvent entraîner des déplacements effectifs de personnes vers certains lieux. Un autre exemple est celui des interactions entre réseaux de transport et dynamiques du territoire. Les conséquences de la mise en place d'infrastructures sont réelles sur le développement territorial même si leur importance et leur apport sont à évaluer selon les territoires (Bérion *et al.*, 2007 ; Offner, 1993). Les réseaux de transport autoroutier peuvent avoir un rôle structurant pour les agglomérations (UrbaLyon, 2010). Des études de relations entre prix immobiliers et accessibilité spatio-temporelle montrent une interdépendance de ces deux aspects (Deymier, 2005).

De même que les humains, les animaux modifient les composantes de l'espace par l'exploitation des ressources et une pression physique exercées lors de leurs déplacements. Nous avons vu que les éléments du paysage peuvent avoir des conséquences sur les déplacements. À présent nous nous intéressons aux pressions que la faune exerce sur l'environnement. Les pressions sont de plusieurs natures.

- La pression de piétinement :

Les passages répétés d'animaux peuvent appauvrir le couvert végétal, et provoquer l'arrachage des branchages. Les conséquences sont souvent proportionnelles à la masse corporelle des animaux et à leur nombre. Par exemple dans Plumptre (2003), les dommages provoqués par les piétinements sont étudiés en fonction des espèces de grands mammifères dans une zone forestière montagneuse au Rwanda. Certaines espèces entraînent des pressions plus fortes, ce qui augmente la durée de résilience de la végétation.

- La pression alimentaire :

Les espèces herbivores exercent des prélèvements sur les ressources végétales. Il arrive que la consommation excessive des essences végétales rende difficile la régénération de parcelles forestières. Dans Boulanger (2010), la pression des cervidés sur des zones forestières en France est analysée. La consommation de jeunes pousses est particulièrement défavorable pour le développement des communautés végétales. Les oiseaux, les petits mammifères ou encore les sangliers mènent des fouilles dans le sol à la recherche de graines ou de vers, actions qui représentent des perturbations en forêt et dans les cultures.

- La pression comportementale :

Les animaux agissent sur l'espace pour répondre à un besoin comportemental. Les besoins peuvent être le marquage d'un territoire ou le frottement pour se débarrasser de parasites.
Les pressions exercées par les animaux modifient l'espace en provoquant des dégradations sur la végétation et le sol. Les hommes agissent pour éviter ces perturbations par des clôtures et des méthodes pour effrayer. La transhumance des troupeaux est un exemple de gestion des ressources végétales appliquées aux espèces d'élevage. En France, la gestion forestière prend en compte les éventuels dégâts que peuvent provoquer les herbivores (IFN, 2006).

Selon Lévy & Lussault (2003), « la mobilité est à la fois un processus avéré, qui se traduit en mouvements effectifs, et un potentiel, une virtualité non actualisée, qui est, justement, ce qui autorise le mouvement réalisé – c'est-à-dire le déplacement ». Un autre aspect dans la mobilité émerge : la potentialité des déplacements. Le terme de motilité signifie dans son sens strict la capacité physique de se mouvoir. Ce terme est repris pour désigner le potentiel de déplacement qui est lié à l'accessibilité des zones géographiques (Lévy & Lussault, 2003 ; Kaufmann *et al.*, 2004). Pour les déplacements d'animaux, cette notion se rapproche de celle d'accessibilité des lieux d'intérêt. Comme pour l'analyse de l'accessibilité des personnes, une méthode d'estimation des possibilités de déplacement des animaux s'appuie sur la description du paysage. Les difficultés à se déplacer sont évaluées à partir de la présence d'obstacles avérés ou supposés. D'autres zones peuvent être considérées comme favorisant ou permettant un déplacement sans effort ou danger particulier. L'estimation du potentiel de mobilité des animaux sur un espace s'effectue à partir d'hypothèses sur le rôle et l'importance des éléments du paysage, hypothèses elles-mêmes issues d'observations sur la faune. Les études de déplacements effectifs servent à évaluer la potentialité de mobilité sur un espace. Nous reviendrons sur l'intégration des connaissances de déplacements dans les analyses des paysages dans la partie I-2.2 traitant des aménagements en faveur de la faune.

Les déplacements comme moyen de mieux connaître le comportement des espèces

L'analyse des déplacements d'animaux permet de mieux comprendre les rythmes de vie et les interactions entre les animaux et leur environnement spatial et social. L'utilisation de l'espace dépend des besoins des animaux, par espèce, par individu, par espace géographique occupée. Il est pourtant délicat d'interpréter les choix de direction de déplacements, notamment lors de déplacements exploratoires. Certains éléments du paysage représentent des limitations physiques comme des murs, des grillages, des pentes fortes. D'autres lieux ont un intérêt

évident : les points d'eau et les zones de végétation attirent les animaux. Il faut noter que la perception visuelle du paysage n'est pas le seul paramètre à prendre en compte puisque les animaux se dirigent majoritairement vers des lieux d'intérêt en fonction d'une mémorisation préalable. Plusieurs travaux s'intéressent aux processus cognitifs et d'apprentissage qui amènent les animaux à emprunter certains chemins plutôt que d'autres et à s'orienter vers des destinations en particulier.

Tolman (1948) parle de carte cognitive pour décrire la représentation mentale de l'espace par un animal. Cette carte cognitive contient les éléments de l'espace, leur intérêt et les relations spatiales et causales qui les lient (McFarland, 2009). Tolman s'est appuyé sur des observations de recherche de chemins par des rats (*Rattus norvegicus*) à travers un labyrinthe. Il affirme que les individus mémorisent des éléments de l'espace même s'ils n'en ont pas besoin immédiatement, c'est-à-dire sans facteur de « renforcement ». La carte cognitive contient des localisations potentiellement utiles, aidant par la suite à trouver des routes optimales pour atteindre ces localisations. L'expérience de Tolman *et al.* (1946) montre que les rats choisissent la direction la plus directe vers une ressource après la modification des chemins d'accès. Comme illustré en Figure I.21.a, le test se déroule en deux temps. Les rats n'ont d'abord qu'un chemin d'accès possible à une ressource alimentaire située face au point de départ. Cette voie est ensuite bloquée alors que d'autres chemins s'ouvrent. La majorité des rats choisissent le chemin le plus court vers la ressource, comme indiqué en Figure I.21.b.

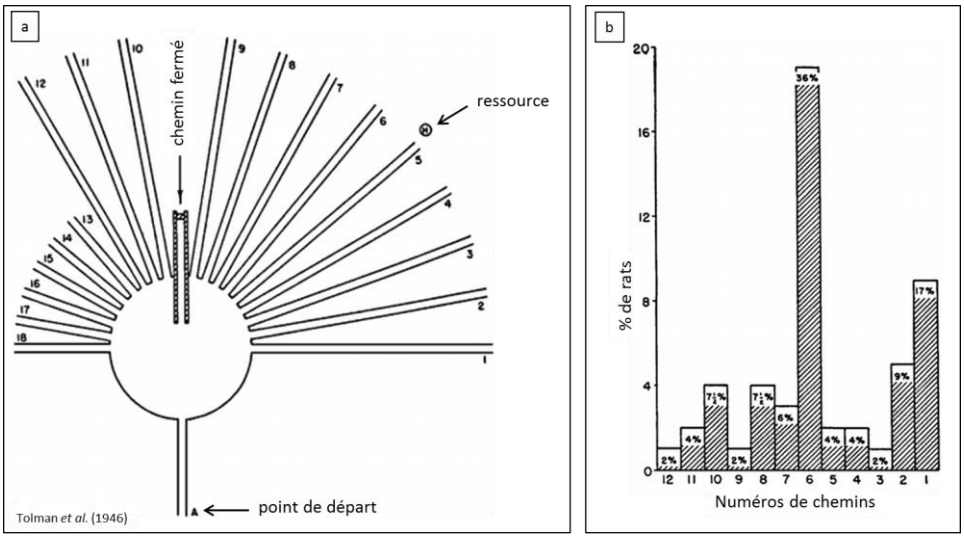


Figure I.21. Tests d'orientation des rats dans l'espace. a) Le système des voies de déplacement : la voie utilisée dans la première partie du test est bloquée dans la seconde partie du test. D'autres voies numérotées de 1 à 18 s'ouvrent. b) Pourcentages de passage selon les voies de déplacement dans la seconde partie du test. D'après Tolman *et al.* (1946). La majorité des rats continuent d'emprunter le plus court chemin vers la ressource.

La théorie de la construction d'une carte cognitive soutient que l'animal a une vision allocentrée de l'espace, c'est-à-dire qu'il se positionne dans un référentiel absolu et non centré sur lui-même. Cette hypothèse de représentation allocentrée est reformulée par O'Keefe & Nadel (1978) en s'appuyant sur l'existence d'une vue en réseau des lieux sur une carte. Les éléments de l'espace sont positionnés également les uns par rapport aux autres. Papastamatiou *et al.* (2011) ont par ailleurs mis en évidence chez certaines espèces de requins une amélioration de la représentation de l'espace avec l'âge. Les routes choisies deviennent optimales entre deux sites d'intérêt, tendant à prouver la formation au fil des expériences d'une carte cognitive. Dans certains cas, la découverte de routes avantageuses peut ne pas découler d'expériences

précédentes. La découverte « soudaine » du plus court chemin entre des sites peut s'effectuer par une réflexion non précédée par des essais infructueux. Cette capacité nommée *insight*, observée chez certaines espèces repose sur le fait que l'animal est capable de se représenter l'espace au-delà de sa perception locale. L'*insight* a été décrit par Köhler (1925) suite à l'observation de la résolution de problèmes par des singes.
D'autres expérimentations sur les capacités cognitives des animaux ont montré que la représentation de l'espace ne passe pas uniquement par des cartes cognitives indépendantes du contexte individuel. Vauclair (1980) a étudié en laboratoire les déplacements de hamsters dorés (*Mesocricetus auratus*) entre leur gîte (terrier) et un lieu d'alimentation, deux localisations liées entre elles par plusieurs chemins possibles. Les réponses aux modifications du réseau par la fermeture de certains chemins et par l'inversion du sens de déplacement sont comparées. Sont alors mises en avant les influences de la position de départ et de la perception locale de l'environnement déterminant des choix de chemins. Bennett (1996) s'interroge sur l'existence d'une carte cognitive utilisée par les animaux indépendamment de la perception immédiate de leur environnement. Il souligne le fait que l'utilisation d'un nouveau chemin entre deux sites peut résulter d'un déplacement antérieur non répertorié, de l'utilisation de points de repère de proche en proche ou d'un mode de navigation à l'estime. Ce dernier mode permettrait à l'animal de repérer la direction d'un site d'intérêt en fonction de sa dernière localisation connue dans son territoire familier. Les expériences sur la cognition animale posent des problèmes de répétabilité et de généralisation, en commun avec celui de la généralisation des relations entre déplacements et paysage. Chez les abeilles (*Apis mellifera*), Gould (2002) a reporté les chemins empruntés de retour à la ruche ou vers un site de nourriture. Ces observations tendent à montrer l'existence d'une représentation absolue de l'espace. Cependant la forme du terrain et la présence de points de repères identifiables par les abeilles peuvent jouer un rôle.
Selon les différents travaux sur la représentation de l'espace par les animaux, il est difficile de conclure sur la manière dont les animaux perçoivent leur environnement. Il est néanmoins clair que les différentes espèces présentent des mécanismes cognitifs. Ces mécanismes interviennent lors des communications entre individus (Griffin, 2004) mais aussi dans leur appréhension de l'environnement. Il semble que les choix de directions lors de déplacements ne soient pas uniquement déterminés par un réflexe d'évitement ou d'exploitation.

Lorsque des modifications interviennent dans les domaines vitaux, les déplacements peuvent être différents car les animaux réagissent aux éléments spatiaux. Les effets des aménagements de l'espace sur l'utilisation de l'espace par les animaux et en particulier sur leur comportement de déplacements, sont liés à l'importance et à la nature des changements provoqués. Les modifications spatiales peuvent être intégrées dans les déplacements par des processus cognitifs plus ou moins rapides, amenant à contourner un obstacle ou à migrer vers un nouveau domaine de vie. Les effets sur les individus et par extension sur les populations sont fonction des besoins de chaque espèce en termes d'habitat et de ressources. Selon leur degré de spécialisation plus ou moins poussée, les espèces vont s'adapter ou non à ce nouvel environnement. Une espèce peut occuper plusieurs types d'habitat, ou consommer des ressources différentes selon les saisons (Clavel, 2007 ; Carrillo *et al.*, 2002). Des processus d'apprentissage peuvent permettre aux animaux d'accroître leurs connaissances et d'adapter leur comportement en fonction de leur environnement. Cet aspect se réfère à la plasticité comportementale des espèces (Jepsen & Topping, 2004). Pourtant, certaines modifications spatiales sont difficiles à compenser (Mennechez & Clergeau, 1999). La fragmentation des habitats et les barrières aux déplacements peuvent représenter des adaptations trop importantes pour les individus. Les mesures prises pour maintenir les espaces de vie des espèces ou pour les améliorer représentent des enjeux pour la santé et la survie des populations.

2.2. Aménagement du territoire en faveur des déplacements de la faune

Nous nous concentrons dans cette partie sur les mesures mises en œuvre pour favoriser en particulier la mobilité de la faune. La possibilité de déplacement constitue une condition nécessaire à la survie des espèces. Les déplacements permettent l'accès à des ressources ainsi que les interactions entre individus et populations. Dans le cadre des politiques de conservation de la faune, les connaissances acquises sont prises en compte dans la définition des types et des emplacements des aménagements.

2.2.1. Des théories de la conservation à la mise en place des aménagements

Principes de l'écologie du paysage appliqués aux déplacements de la faune

Les approches de protection de la faune sauvage s'inscrivent dans le cadre théorique concernant le fonctionnement des écosystèmes. La compréhension de la présence et de l'évolution des populations animales concerne en bonne partie les espaces dans lesquels elles vivent. Pour favoriser la préservation de la faune sauvage, il convient de connaître les mécanismes de co-dépendance entre les animaux et leur environnement physique. Deux sciences sont dédiées à cette connaissance, la biogéographie et l'écologie du paysage. Lacoste & Salanon (1999) définissent la biogéographie comme ayant « pour objet l'étude de la répartition des organismes à la surface du globe et la mise en évidence des causes qui régissent cette répartition ». La biogéographie est une discipline s'attachant à étudier les causes spatiales et historiques de la répartition des êtres vivants. L'écologie du paysage est définie par l'Association Internationale d'Écologie du Paysage[13] comme la discipline qui étudie « les variations spatiales des paysages à plusieurs échelles [et qui] prend en compte les causes et conséquences biophysiques et sociales sur l'hétérogénéité des paysages ». L'écologie du paysage s'intéresse au rôle de la structure des paysages sur le fonctionnement des écosystèmes à une échelle essentiellement paysagère c'est-à-dire kilométrique. Ces deux disciplines ont en commun de considérer comme un acteur à part entière la société humaine dans les processus écologiques. Elles complètent les deux autres approches importantes intervenant dans les études de l'influence de l'espace sur la faune : les analyses du paysage en géographie qui s'intéressent à comprendre les paysages et leurs évolutions en considérant les facteurs sociaux et géomorphologiques, et les analyses du comportement animal en écologie, cf. Figure I.22.

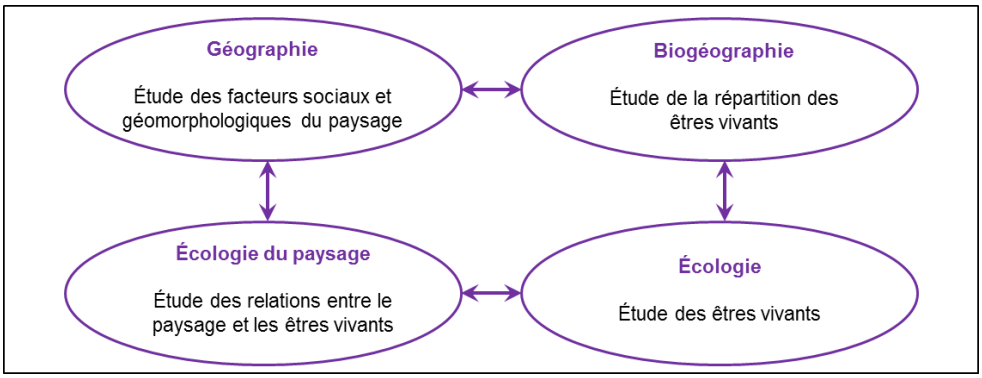


Figure I.22. Les différentes disciplines s'intéressant aux paysages et à aux fonctionnements des êtres vivants.

[13] Site Web : [http://www.landscape-ecology.org/]

Nous présentons à présent les principes de l'écologie du paysage qui s'attachent aux relations entre le paysage et la faune. L'écologie du paysage s'articule principalement autour de trois aspects du paysage : sa structure, ses fonctions et ses évolutions (Forman & Godron, 1986). Plusieurs points sont centraux dans les analyses :

- la caractérisation de l'hétérogénéité du paysage : il s'agit d'identifier ses composants, appelés aussi éléments ou unités, représentant des zones homogènes à l'échelle d'étude. Cette qualification de l'hétérogénéité est associée à un vocabulaire particulier : la fragmentation du paysage. La fragmentation se réfère à une intensification du morcellement du paysage. Le nombre d'unités homogènes augmente corollairement à la diminution de la taille de ses unités. Cette notion se rapproche des principes de la théorie biogéographique des îles énoncée par MacArthur & Wilson (1963) ;
- la prise en compte des différentes échelles spatiales et temporelles. Les processus écologiques ont des vitesses et occupent des emprises variées. Le temps intervient dans les analyses du paysage par la prise en compte de l'historique des évolutions. Les processus écologiques interviennent de l'échelle biologique à celle d'un écosystème, de l'échelle des parcelles paysagères à celle de la région. Les dynamiques entre individus et paysages interagissent à ces différentes échelles (Wiens *et al.*, 1993).

Une des causes identifiées dans la baisse de la biodiversité est la fragmentation du paysage. Pour les animaux, cela se répercute directement sur leurs habitats. Comme vu dans le début de ce chapitre, le problème vient de la diminution en surface des zones d'habitat, appelées taches d'habitat. Il vient aussi de la perte en qualité des habitats, et des séparations entre les zones (Galois & Bonin, 1999). Des évolutions du paysage accentuent cette fragmentation. Par exemple, la déforestation dans certains pays réduit le potentiel d'accueil des espèces animales spécialisées dans cet habitat. En France, l'urbanisation, la déprise agricole, les mutations des pratiques forestières, agricoles et d'élevage ont modifié les paysages et les espaces sur lesquels vivent les populations animales (Cohen *et al.*, 1997 ; Courtois *et al.*, 2002).
Quantifier l'hétérogénéité du paysage nécessite une étape de lecture et d'attribution des unités paysagères selon leur structure et leur fonction. Burel & Baudry (1999) parlent de catégories d'éléments. La structure paysagère se décompose en taches, en corridors et en une matrice correspondant à l'élément du paysage majoritaire, comme illustré en Figure I.23.

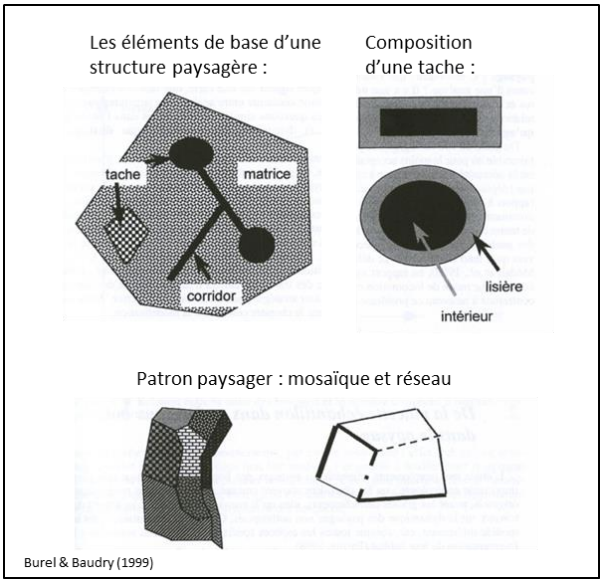


Figure I.23. Les catégories d'éléments du paysage en écologie du paysage par Burel & Baudry (1999).

La structure d'un paysage correspond en première approximation à des unités visuellement différenciables. Il s'agit de déterminer quels rôles jouent ces espaces pour la faune et s'ils sont fonctionnels pour leurs déplacements. Si une unité paysagère est une tache d'habitat pour une espèce, un individu restera dans cette tache ou se déplacera d'une tache à l'autre. L'occupation de l'espace par la faune est liée à la composition du paysage. Lorsqu'un individu se déplace, il le fait préférentiellement à l'intérieur de sa tache d'habitat, si elle est de surface suffisante. Lorsque les taches sont trop petites ou par nécessité de migration, l'individu peut être amené à voyager entre les taches d'habitat. Les corridors écologiques sont des zones propices aux déplacements entre les taches. Ils ne sont pas forcément de même nature que les taches. Les corridors permettent la continuité d'un paysage. Ils relient les zones d'habitat entre elles. Certaines zones appartenant à un corridor constituent également des zones de vie pendant une période plus ou moins longue (Pereboom, 2006). Plusieurs structures de corridors sont identifiées comme illustré en Figure I.24. Leur utilisation par les animaux se traduit par des déplacements de différents types et à différentes échelles.

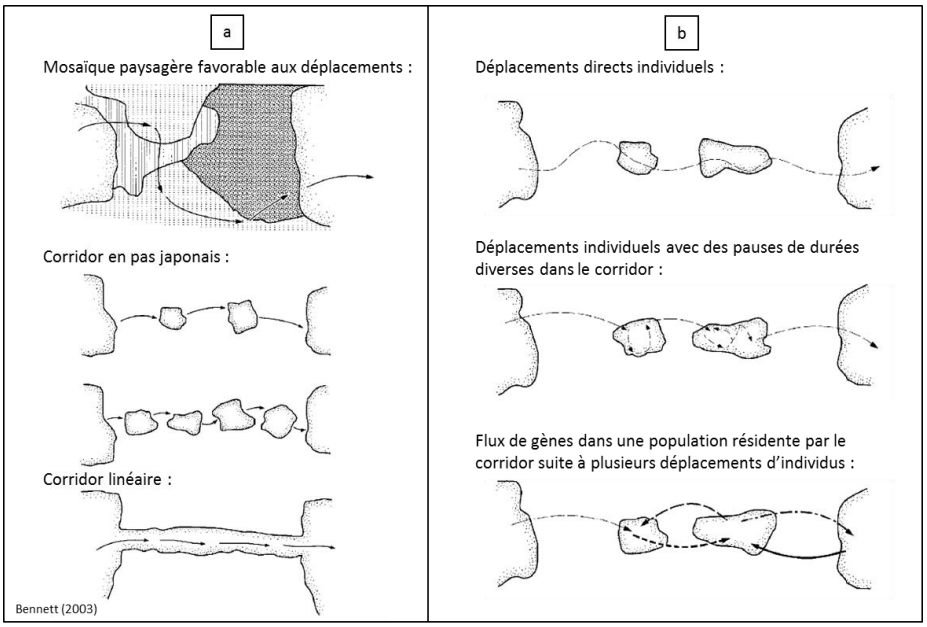


Figure I.24. a) Les différentes structures de corridors et b) les fonctions des continuités paysagères lors des déplacements d'animaux (Bennett, 2003). Les flèches représentent les déplacements schématiques.

Compte tenu des pressions anthropiques et de la disparition de grandes zones sans dérangements humains, les mesures en faveur de la faune sauvage mettent à présent l'accent sur le maintien de zones pour la circulation des animaux. Des corridors facilitent les déplacements des individus et évitent un enfermement dans des taches trop petites. Les approches actuelles sont orientées vers la préservation de continuités entre milieux, ou du moins de liaisons entre les habitats.

L'application de l'approche par réseaux écologiques dans les politiques publiques

La protection en faveur de la faune sauvage a connu plusieurs approches historiques jusqu'aux Grenelles de l'environnement I et II et la définition de la Trame verte et bleue. Les premières approches ont été mises en œuvre par une préservation totale de quelques zones délimitées d'une nature remarquable. Elles ont ensuite évolué vers une mise en avant de la nécessité de circulation des espèces notamment animales, et de l'intégration des mesures de protection dans les activités humaines. L'étude des déplacements prend ici son sens au vue de la mise en place

des approches par connectivité des habitats. Le principe des réseaux écologiques s'appuie sur la notion de continuités fonctionnelles, c'est-à-dire utilisées effectivement par les animaux et ayant un impact sur leur distribution. Il s'appuie sur l'identification des taches d'habitat, et sur la création ou la sauvegarde de corridors (Bonnin, 2008). L'approche par réseau se distingue des mesures antérieures de protection de la faune par les aspects présentés ci-dessous.

La mise en place d'un réseau suppose tout d'abord qu'un large territoire soit couvert. Un réseau écologique a pour objectif de quadriller un territoire, comme un réseau de transport desservant l'ensemble des régions d'un pays. La protection de la faune n'est plus cantonnée aux zones protégées qui sont délimitées par des frontières. Ces frontières rendent ces zones plus ou moins hermétiques aux interactions entre l'intérieur soumis à un contrôle strict et l'extérieur non protégé. Les zones protégées restent utilisées comme des nœuds de réseaux, comme des taches importantes. Ces taches ont pour vocation d'être reliées entre elles et complétées par d'autres taches.
La notion de réseau appelle à un emboîtement hiérarchique d'échelles spatiales et temporelles. Des réseaux sont créés sur un territoire, par exemple sur un continent ou sur un pays. Les réseaux peuvent s'intégrer mutuellement afin d'améliorer leur efficacité. Certains réseaux ont des fonctions particulières. Un réseau peut être dédié à la migration d'oiseaux. Il sera alors principalement constitué de sites de repos et de nourrissage en des emplacements rapprochés pour les escales. Un autre réseau peut par exemple être voué à des déplacements de mammifères terrestres.
La création de réseaux complète la politique des aires protégées en amenant à prendre en compte la nature dite ordinaire. Les actions de protection ne sont plus réservées à la nature exceptionnelle, aux paysages et aux espèces végétales et animales emblématiques. La notion d'interdépendance entre les entités des écosystèmes a amené une intégration de l'ensemble des espèces dans les mesures de préservation. Les habitants réclament aussi un accès simplifié et continu à la nature (Godet, 2010). La valorisation des animaux communs vient aussi bien de leur importance reconnue dans les processus écologiques que de l'insatisfaction de la coupure du contact entre des citoyens majoritairement urbains et la faune sauvage.
L'intégration de l'homme dans la protection de la nature s'inscrit dans de nouvelles démarches (Veyret & Simon, 2006 ; ASS, 2011). Les parcs nationaux sont par exemple organisés en plusieurs zones. Le cœur de parc suit des réglementations strictes et peut contenir des réserves intégrales. Une aire d'adhésion entoure le cœur de parc. Celle-ci engage les communes à une charte et à des pratiques responsables. La mise en place de corridors n'est pas uniquement la prolongation des aires protégées. Elle a plutôt pour but de conserver des sites sensibles sous protection et d'intégrer des corridors dans des espaces plus ou moins anthropisés. La gestion des corridors est cependant à adapter selon les territoires et les activités humaines (Carrière *et al.*, 2008).

En France, un plan de préservation de la biodiversité a fait suite au Grenelle de l'Environnement en 2007. Le Code de l'Environnement intègre à présent des « Orientations nationales pour la préservation et la remise en bon état des continuités écologiques » ainsi que des Schémas Régional de Cohérence Écologique (Allag-Dhuisme *et al.*, 2010). L'objet de cette politique est de limiter la perte de biodiversité en s'appuyant sur le maintien ou la reconstitution de continuités écologiques. Les Études d'Impact Environnemental, conduites en amont des grands travaux d'infrastructures, sont ainsi complétées par une identification des zones d'importance écologique. En termes d'aménagement du territoire, cela se traduit par la mise en place d'une Trame verte et bleue (TVB). Il s'agit de protéger ou de restaurer les liaisons entre des « réservoirs de biodiversité ». Les actions sont menées par les collectivités territoriales communales et régionales, et par l'État. Les politiques publiques s'appuient sur les principes de

l'écologie du paysage, appliqués aux espèces végétales et animales. La démarche vise à l'intégration des problématiques environnementales par la société actuelle.

La mise en place d'aménagements du territoire entraîne des changements dans les paysages. Que ce soit pour la construction d'une route ou pour la délimitation d'une zone protégée, on cherche à prédire leurs conséquences sur le fonctionnement des écosystèmes. Des scénarios peuvent être testés en s'appuyant sur des connaissances correspondant au contexte. Selon Burel & Baudry (1999), « l'écologie du paysage doit tester les différents scénarios, développer des outils pour modéliser leurs effets sur le court et le moyen terme, et évaluer si oui ou non les attendus de tel ou tel aménagement seront atteints ». C'est une des motivations de la discipline qui s'efforce d'identifier les relations entre paysages et écosystèmes et entre évolutions spatiales et processus écologiques. Les effets de modifications de l'espace restent cependant difficiles à prévoir sur les différentes composantes des écosystèmes et sur les déplacements d'animaux. La prise en compte des données socio-économiques joue aussi un rôle clé pour appréhender les incidences économiques et sociales des modifications des paysages. Lévy & Lussault (2003) écrivent : « l'aménagement est géographie – inscription sur la terre – et cette géographie doit faire sens ». Les aménagements du territoire doivent s'inscrire dans la durée et être accompagnés par plusieurs études complémentaires pour augmenter les effets positifs sur la faune (Bastian, 2001).
Afin d'évaluer les effets des aménagements, les connaissances sur le comportement des animaux sont essentielles. De nombreuses sources de connaissances existent sur la faune sauvage. L'enjeu est de sélectionner celles qui sont pertinentes pour évaluer l'influence des aménagements sur la mobilité des animaux. Différentes méthodologies sont possibles pour intégrer ces connaissances. Nous présentons à présent quelques approches pour identifier les continuités paysagères à même de favoriser les déplacements.

2.2.2. Les méthodologies

Les principes de l'écologie du paysage offrent un cadre pour limiter les effets négatifs de modifications du paysage sur la faune. La mise en œuvre est souvent complexe, la prise en compte de l'ensemble des processus dans un écosystème étant hors de portée. Les connaissances sur les déplacements de la faune sauvage restent partielles bien que de nombreuses études offrent des éléments de compréhension. Des démarches se proposent d'intégrer ces connaissances pour caractériser l'espace et l'aménager dans un souci de « transfert des résultats de recherche fondamentale vers la biologie de la conservation, l'aménagement et la gestion des territoires » (Burel & Baudry, 1999). Nous abordons l'utilisation des informations sur la faune et ses déplacements en aménagement du territoire. Nous revenons ensuite sur une sélection de méthodes employées pour caractériser l'espace et pour proposer une planification du territoire.

Des espèces animales et des fonctionnements écologiques

Les exigences spatiales diffèrent selon les espèces. L'enjeu des politiques de préservation de la faune lors d'aménagements est de répondre aux besoins de différents animaux selon les espaces concernées. Des cartographies de l'espace pour chaque espèce peuvent être par exemple éditées. Dans Van der Sluis *et al.* (2004), ces cartes sont construites selon les espèces et selon leur type de déplacement. Elles distinguent :

- les zones correspondant à leur milieu d'habitat. Selon la spécialisation de l'espèce en question, les types de milieux pris en compte sont plus ou moins nombreux. Outre la

nature du milieu, des critères de superficie minimale interviennent dans la délimitation de ces zones ;

- les flux de déplacements. Les espaces traversés lors de migrations régulières sont prises en considération. Les migrations définitives sont quant à elles implicitement prises en compte par la cartographie des milieux favorables ;
- les obstacles aux déplacements correspondant à la présence d'infrastructures difficilement franchissables ou à un éloignement entre les zones d'habitat potentielles.

La Figure I.25 permet de comparer les zones d'habitat favorable pour le lynx (*Lynx lynx*) et pour les invertébrés saproxyliques (qui dépendent et participent à la décomposition du bois mort). Les deux cartes montrent des similitudes car les espèces considérées dépendent des forêts. Ces espèces se distinguent pourtant par une utilisation différente de la forêt. Pour les insectes, les types d'essences sont détaillés. Pour le lynx qui se déplace beaucoup, la connectivité entre les zones forestières est l'information la plus pertinente.

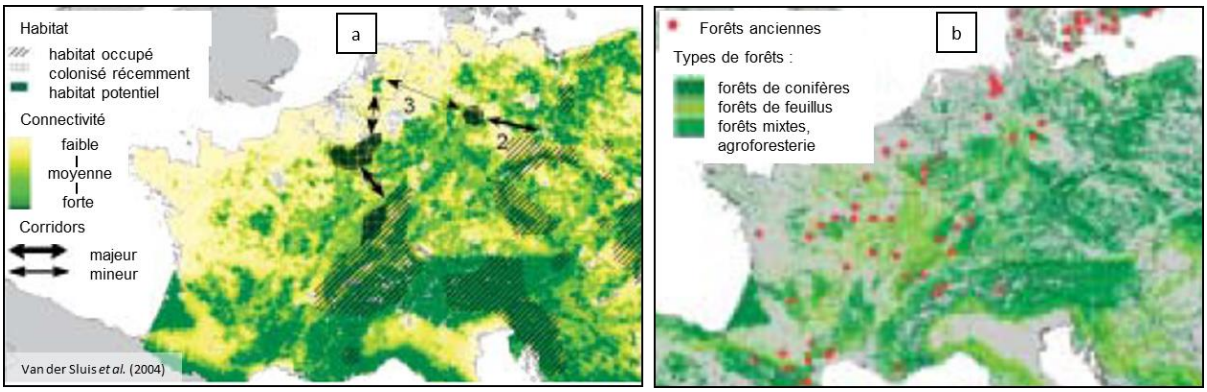


Figure I.25. Cartographie des zones d'habitat favorable a) pour le lynx, b) pour les invertébrés saproxyliques d'après Speight (1989). Cette cartographie permet d'identifier des zones de continuités à renforcer. Dans Van der Sluis *et al.* (2004).

Les cartographies des milieux a priori favorables selon les espèces permettent une hiérarchisation des zones d'après leur importance. Les ruptures de connectivité entre les zones favorables peuvent être identifiées à partir des cartes, de même que des zones dont la connectivité doit être maintenue ou renforcée. En I-2.1.5, nous avons mentionné la notion de carte cognitive qui correspond à la représentation de l'espace par les animaux, mais qui reste locale. Une carte des milieux favorables ne prend pas en compte le point de vue individuel mais permet d'avoir une vue synthétique par espèce des zones d'intérêt sur de grandes portions de territoire.

Dans le cadre de projets d'aménagement, la prise en compte des besoins de chaque espèce est difficile à concilier si l'emprise considérée est grande. Les approches retenues proposent de s'intéresser à des espèces significatives. C'est le cas dans la mise en place de la Trame verte et bleue. Plusieurs concepts se rapportant à des types et à des fonctions d'espèces dans les écosystèmes ont émergé, afin d'évaluer l'impact potentiel de leur préservation. Les espèces à valeur patrimoniale sont des espèces bénéficiant d'une symbolique forte. Elles n'ont pas de définition stricte mais sont souvent attachées à un territoire particulier et renvoient une image généralement positive auprès de la société. C'est par exemple le cas des hérissons en France, ou de l'euprocte des Pyrénées qui est un amphibien endémique de la région. La valeur écologique des espèces est intégrée avec les notions d'espèce parapluie ou d'espèce clé de voûte. Une espèce parapluie est considérée comme telle lorsque sa protection et celle de son habitat

couvrent les besoins d'autres espèces. Si un type de végétation particulier est protégé en faveur d'une espèce, cela peut permettre de protéger d'autres espèces utilisant cette végétation. Des espèces occupant de larges domaines vitaux sont souvent choisies comme espèce parapluie car la sauvegarde de larges étendues spatiales entraîne celle de plusieurs milieux et de plusieurs niches écologiques. Il peut s'agir de grands mammifères comme les ours, ou d'oiseaux comme le grand tétras (*Tetrao urogallus*) (Roberge & Angelstam, 2004). L'efficacité supposée de la prise en compte d'une espèce parapluie sur les autres espèces reste pourtant discutée. Roberge & Angelstam (2004) dressent un bilan des espèces qualifiées de parapluie et de leur lien entre le type de milieu visé et les espèces potentiellement couvertes par leur protection. La portabilité interspécifique semble souvent partielle mais elle reste intéressante à prendre en compte dans les mesures de protection de la faune. La notion d'espèce clé de voûte est employée pour les espèces ayant une forte influence sur leur environnement. Cette influence est en lien ou non avec la densité de leur population, comme pour les abeilles ou les castors (Schulze & Mooney, 1994). La disparition d'une espèce clé de voûte perturbe les autres espèces dépendantes ou interagissant avec elle. Elles figurent ainsi parmi les espèces intéressantes à considérer dans les stratégies de conservation (Lecomte, 2006). Des espèces sensibles aux modifications de leur environnement peuvent également être sélectionnées pour suivre des modifications parfois difficiles à percevoir. Par exemple les salamandres terrestres ont été proposées comme indicateurs de la santé des forêts (Marsh *et al.*, 2005).

En plus de la sélection d'espèces cible lors de la définition de mesures de protection, des approches complémentaires sont exploitées. Pour la caractérisation du paysage dans le cas des déplacements de la faune, deux familles existent, une dite structurelle et l'autre fonctionnelle (COMOP TVB, 2010). L'analyse structurelle utilise une cartographie des éléments du paysage afin de déterminer et de qualifier les zones probables de présence d'animaux ou d'intérêt pour leurs déplacements. Au sens strict, l'analyse fonctionnelle de l'espace part de déplacements observés et identifie ensuite les éléments du paysage réellement utilisés. Ces approches sont mises en œuvre pour préciser la connectivité du paysage, connectivité nécessaire pour que les animaux puissent occuper l'espace dont ils ont besoin. Nous avons vu en I-1.2.2 que la connectivité structurelle ne se révèle pas obligatoirement fonctionnelle. La connectivité appliquée au paysage est en effet définie comme une relation fonctionnelle entre les taches d'habitat mais les corridors sont des structures qui permettent les déplacements d'individus et la connexion entre des zones d'habitat (With *et al.*, 1997). Les aménagements de corridors peuvent faciliter les déplacements mais il n'est pas garanti qu'ils soient empruntés. Dans l'approche structurelle, la caractérisation des éléments du paysage utilise des connaissances récoltées au préalable sur la faune, sur leur comportement et leur « fonctionnement ». L'approche fonctionnelle est contrainte par l'emprise spatiale qu'elle recouvre et gagne à être complétée par une généralisation des connaissances hors des zones de suivi. Les deux approches sont donc complémentaires.

Les connaissances sur les déplacements

L'évaluation de l'influence des éléments du paysage sur les déplacements d'animaux requiert des connaissances sur la faune, leurs déplacements ainsi qu'une description de l'espace. La saisie et l'enregistrement d'observations sont des étapes cruciales dans la constitution de corpus de savoirs. Les techniques de suivis des déplacements de la faune décrites précédemment comme le GPS et le radiopistage produisent des données de localisations. Ces données sont ensuite analysées afin d'en déduire des relations entre espace et déplacements.

Les seules données sur les déplacements permettent d'étudier les rythmes des animaux. En dehors de tout contexte géographique, les localisations successives peuvent être interpolées pour obtenir des trajectoires linéaires. Le temps permet d'évaluer la vitesse et les rythmes quotidiens des déplacements. Calenge *et al.* (2009) propose une mise en œuvre de descripteurs de trajectoires d'animaux. Ils calculent des indicateurs afin de décrire la forme de la trajectoire : distances parcourues entre les localisations, angles relatifs, distances entre les localisations successives et une localisation origine. Ces indices peuvent être pertinents pour comparer la forme des trajectoires entre plusieurs individus d'une même espèce et entre plusieurs espèces (Tablado *et al.*, 2010).

La rapidité ou l'absence de mouvement sont en relation avec les activités : repos, alimentation, exploration, fuite. La segmentation de l'objet trajectoire a pour but d'identifier des rythmes homogènes. C'est un sujet de recherche qui englobe tous les types d'objets mobiles et qui peut être décliné selon la thématique. Dans Spaccapietra *et al.* (2008), un objet trajectoire a deux aspects, un géométrique et l'autre sémantique. La forme du déplacement est enrichie par des indications sur les activités. La trajectoire est décomposée en activités génériques : en arrêt, en mouvement et en un couple départ/arrivée. Cette modélisation représente une interprétation de la description géométrique des localisations. Comme en Figure I.10 (partie I-2.1.1), des périodes de repos et des périodes d'activités peuvent être caractérisées. Des méthodes de clustering sont proposées pour segmenter les déplacements et pour identifier des zones d'intérêt (Palma *et al.*, 2008). Mefteh *et al.* (2012) présentent une organisation des types de déplacements de mammifères marins à partir de localisations enregistrées sur les phoques. La trajectoire interpolée est décomposée en séquences d'activités. Les activités sont liées au moment et à la position des animaux : profondeur dans l'eau, proximité de sites de chasse.

La chronologie des déplacements est prise en compte pour appréhender les interactions entre espèces. L'exploitation de l'espace par deux espèces différentes peut être étudiée à partir de leurs trajectoires. Dans Schmidt *et al.* (2009), les relations spatio-temporelles des trajectoires enregistrées de loups et de lynx sont analysées afin d'extraire d'éventuelles rencontres ou des évitements entre animaux. La Figure I.26 illustre les déplacements simultanés d'un loup et d'un lynx. Leurs trajectoires se croisent et il y a une rencontre si les passages sont synchronisés.

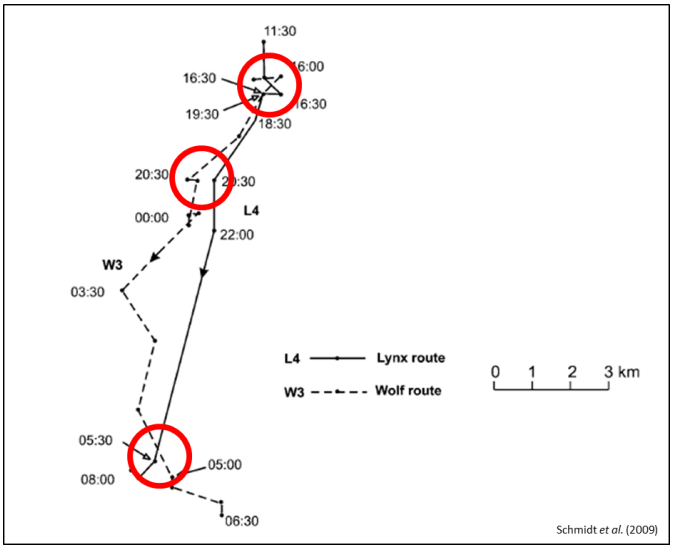


Figure I.26. Déplacements d'un lynx mâle (L4) et d'un loup (W3, associé à sa meute) en Pologne dans la forêt primaire de Bialowieza. Enregistrements des 23 et 24 octobre 1995 (Schmidt *et al.*, 2009). Les rencontres potentielles sont entourées en rouge : vers 16 h 30, 20 h 30 et vers 5 h le lendemain.

Les chemins empruntés par différentes espèces sont liés aux rythmes de leurs déplacements et donc de leurs activités. Les trajectoires interpolées représentent ces chemins. Ce sont les objets d'étude des interactions entre les animaux et l'espace.

Les connaissances relatives à l'influence de l'espace sur les déplacements

La compréhension des choix de déplacement par les animaux motive les suivis de la faune. Elle demeure incomplète car la connaissance du fonctionnement cognitif des animaux reste partielle. De plus, même dans le cadre connu d'une étude de suivi de faune, les informations environnementales ne sont pas exhaustives. Or, la précision des données environnementales ainsi que leur exhaustivité influencent les résultats de recherche. La description de l'espace joue un rôle important dans la localisation des animaux. D'autres variables ont également des répercussions sur les choix de déplacement : interactions sociales et hiérarchiques au sein d'un groupe, cohabitation avec d'autres espèces, dérangements anthropiques allant de la présence d'un piéton à des pollutions sonores. Les variables météorologiques, en dehors de tout effet à long terme sur les ressources, peuvent influencer l'amplitude et la forme des déplacements (Madison, 1980).

L'identification de l'influence des variables spatiales sur les déplacements s'appuie sur la recherche de relations entre les observations des animaux et la description des éléments du paysage. Ces liens peuvent être visuellement identifiables comme en Figure I.27 montrant des vols migratoires de cigognes (*Ciconia ciconia*). Les cigognes utilisent les courants ascendants pour planer et dépenser ainsi moins d'énergie. Ces courants ne se formant pas au-dessus des grandes étendues d'eau, elles évitent alors la traversée de la mer Méditerranée en la contournant ici par l'est. Elles suivent également une partie de la Vallée du Grand Rift qui représente un étroit couloir de déplacement et qui les dirige.

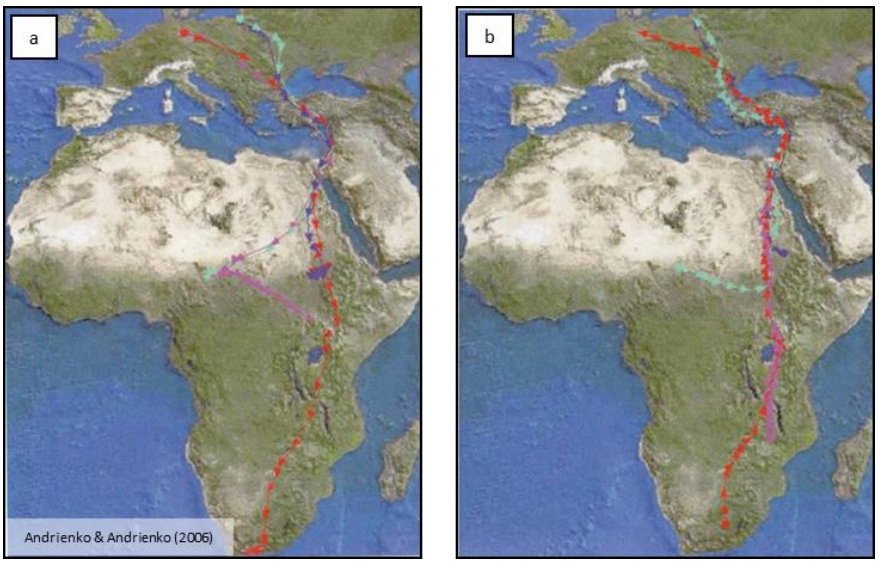


Figure I.27. Visualisation des relations entre déplacements et espace par superposition de vols migratoires de cigognes avec une image satellite. Enregistrements : a) entre le 20 août 1998 et le 31 janvier 1999, b) entre le 1er février 1999 et le 1er mai 1999 (Andrienko & Andrienko, 2006). Les cigognes évitent de traverser au-dessus de la mer Méditerranée et longent la Vallée du Grand Rift.

Nous avons cité par exemple en I-1.2 des études sur les conséquences des infrastructures linéaires de transport sur la présence et les déplacements des espèces animales. Pour estimer

l'impact des différentes variables dans le rapport entre paysage et présence de faune, les méthodes statistiques permettent de calculer des corrélations. Des modèles évaluent la probabilité de l'effet des variables sur l'occupation de l'espace. Ce peut être des variables se référant à l'animal ou des variables spatiales et environnementales (Cobben *et al.*, 2009). Les recherches de liens entre déplacements et espace sont intéressantes pour expliquer les trajets empruntés par les animaux. Dans De Sadeleer *et al.* (2003), les effets des infrastructures de transport sont évalués par groupe d'espèces, à partir de plusieurs observations. La formalisation des conséquences permet de se rendre compte de l'appréhension des éléments du paysage par les animaux et de leur rôle d'obstacle.

La question de la généralisation des études de cas se pose pour proposer des planifications d'aménagements du territoire (Yoccoz *et al.*, 2001). Les stratégies d'aménagement en faveur des déplacements de faune et de la préservation des milieux doivent faire face à une variété de paysages qui peut rendre plus ou moins ad hoc les études préalables sur les conséquences de modifications de l'espace. L'évaluation des changements du paysage sur les écosystèmes passe par une sélection d'espèces. Il peut s'agir d'espèces considérées comme parapluie ou comme clé de voûte. Pour des mesures de protection concernant une espèce en particulier, les actions peuvent être ciblées. Les effets de ces actions peuvent se répercuter sur l'écosystème. C'est le cas des mesures de protection du grand hamster d'Europe en Alsace qui cherchent à préserver certains types de cultures favorables à cette espèce (Amand *et al.*, 2012). La comparaison des déplacements entre différentes espèces est un point important dans les politiques de protection de la faune. Cela permet d'identifier les variations des besoins et des réponses aux éléments du paysage. Les résultats issus d'études contextuelles servent à formuler des hypothèses sur l'influence de l'espace : rôle et importance sur les déplacements, en fonction de l'espèce ou de manière absolue. Ces hypothèses, ou ces généralisations des connaissances, sont intégrées aux modélisations du paysage et de leurs effets sur les déplacements. L'évaluation des effets des évolutions du paysage sur la faune reste délicate car l'espace doit être bien modélisé pour correspondre à l'utilisation qu'en ont les espèces animales.

Modélisations du paysage et de leurs effets sur les déplacements de faune

Pour répondre aux questionnements quant aux conséquences des modifications de l'espace sur les déplacements, des modélisations spatiales sont proposées. Ces modélisations ont pour but de représenter l'espace tel qu'il est vécu par les espèces : zones de vie avec des lieux consacrés selon les activités. Les approches présentées ci-après mettent également en avant la perception de l'espace par les animaux lors des déplacements. Les différents modèles existants servent à visualiser les éléments du paysage selon le point de vue de la faune et favorisent leur prise en compte lors des aménagements. Ils constituent un support privilégié pour tester des scénarios de changements du paysage. Ces scénarios peuvent simuler des modifications du paysage et la comparaison entre un état avant et un état après aménagement permet de révéler les conséquences de ces modifications.

Plusieurs approches de modélisation de l'espace sont présentées succinctement. Elles jouent un rôle en amont de la mise en œuvre d'aménagements dans les buts :

- de visualiser les lieux de vie des espèces et de caractériser l'espace selon le rôle joué sur les déplacements de faune ;
- d'identifier les continuités de paysage : les continuités de milieux en particulier pour conserver des liens entre des zones d'habitat favorable et garder des voies de migration ;
- d'évaluer des effets de modifications du paysage : les conséquences peuvent être plus ou moins importantes selon les espèces. Les modifications du paysage concernent des

constructions anthropiques a priori perturbatrices de milieux et génératrices d'obstacles au déplacement.
Nous présentons quelques approches qui modélisent l'espace pour la prise en compte de la faune dans les aménagements du territoire. Ces approches ont permis de nous positionner par rapport à notre problématique et de définir l'approche globale de la thèse.

- Indices paysagers

L'écologie du paysage définit et utilise de nombreux indices paysagers. Les indices paysagers sont intéressants car ils permettent de modéliser l'espace en sélectionnant certains aspects du paysage. Ils décrivent la composition et la configuration des paysages. Ils servent à qualifier l'hétérogénéité dans les paysages et la connectivité des milieux (Burel & Baudry, 1999). Certains indices peuvent être calculés à partir d'une représentation des données géographiques en raster. Les pixels caractérisés selon l'occupation du sol sont les unités de calcul. D'autres indices s'appuient sur des données avec une topologie reconstruite pour évaluer la connectivité sur un réseau. Pour un paysage donné, l'enjeu est de sélectionner les indices qui rendent le mieux compte de l'état du paysage et si besoin de son évolution en fonction des exigences et du comportement de l'espèce (Watts & Handley, 2010). Par exemple pour estimer la connectivité entre les taches d'habitat favorable pour une espèce, des indices sur la forme des unités du paysage peuvent se révéler pertinents. La difficulté reste la définition des paramètres des formules de calcul des indices. Elle consiste également à éviter les redondances selon les espèces (Baranyi *et al.*, 2011). Concernant la forme des unités paysagères considérées, les indices calculent la superficie ou le périmètre selon la modélisation géométrique. La forme même des unités peut être intéressante : convexité, élongation, compacité, dimension fractale (Ducrot, 2005). Pour qualifier la fragmentation des habitats et identifier des continuités de milieux, la densité des unités du paysage et leur proximité sont exploitées. Des opérations géométriques sur les objets permettent de mettre à jour des continuités. L'emploi du traitement par dilatation-érosion des zones d'habitat est une approche structurelle, employée notamment en amont de la définition de la Trame verte et bleue (Amsallem *et al.*, 2010). Des seuils de distances doivent cependant être définis dans la considération des continuités. Ces seuils peuvent être définis par espèce ou par guilde d'espèces, c'est-à-dire pour des espèces inféodées au même type d'habitat. Ce traitement peut être appliqué à différents milieux : forestier, agricole, humide, aquatique. L'identification de certains éléments du paysage s'appuie sur les indices de formes et de distribution. Par exemple, les haies peuvent être identifiées à partir de leur structure linéaire et leur localisation contextuelle.
Les limites des indices du paysage ont trait aux choix de modélisation et de simplification qu'ils nécessitent. La dépendance à l'échelle spatiale des valeurs des indices doit être considérée (Li & Wu, 2004). La difficulté réside aussi dans les choix de seuils sur les indices pour qualifier la connectivité structurelle. Par exemple, la théorie de la percolation suggère qu'au-delà d'un certain seuil de continuité paysagère, les flux écologiques sont effectifs (Metzger & Décamps, 1997). La détermination du seuil est soumise au contexte du cas d'étude.

- Détermination des coûts de déplacement

La modélisation des éléments du paysage passe par l'estimation du coût que ces éléments représentent pour les animaux lors de leurs déplacements. Il s'agit de qualifier l'espace selon sa résistance aux déplacements ou à l'inverse selon sa perméabilité. Des matrices de coût au déplacement sont déterminées, notamment à partir d'indices paysagers, pour ensuite calculer des chemins entre deux localisations (Adriaensen *et al.*, 2003). Certains éléments sont modélisés comme favorisant ou alors freinant les déplacements. Le type d'occupation du sol ainsi que les

caractéristiques des unités paysagères interviennent sur les déplacements, par exemple comme lors de l'évitement des zones sans végétation par les coléoptères dans Wiens & Milne (1989).
La validité des matrices de coût s'effectue par comparaison avec des trajets observés. Dans Stevens *et al*. (2006), les mouvements de dispersion du crapaud calamite (*Bufo calamita*) sont observés par analyses génétiques. La confrontation des déplacements générés à partir de matrices de coût montre une meilleure adéquation avec la matrice correspondant aux observations des préférences d'habitat plutôt qu'avec la matrice correspondant aux résistances de déplacement. Cette comparaison permet de mieux modéliser l'espace dans sa prise en compte lors d'aménagements. Les différents éléments du paysage peuvent se voir attribuer un coût. L'influence de la géologie et de la configuration des falaises ainsi que l'effet de barrière des rivières sont ainsi confirmés dans l'étude des déplacements de rongeurs (viscaches, *Lagidium viscacia*, dans Walker *et al.*, 2007). La distinction entre les éléments jouant à la fois un rôle d'habitat et permettant des déplacements, et les éléments qui ne permettent que les déplacements, enrichit la caractérisation de l'espace (Paillat & Butet, 1994). Comme illustrée en Figure I.28 concernant l'espèce cerf (*Cervus elaphus*) (Guinard & Ferreira, 2008), les cartes de coût de déplacement sont intéressantes pour simuler des modifications de l'espace et leurs conséquences sur des déplacements.

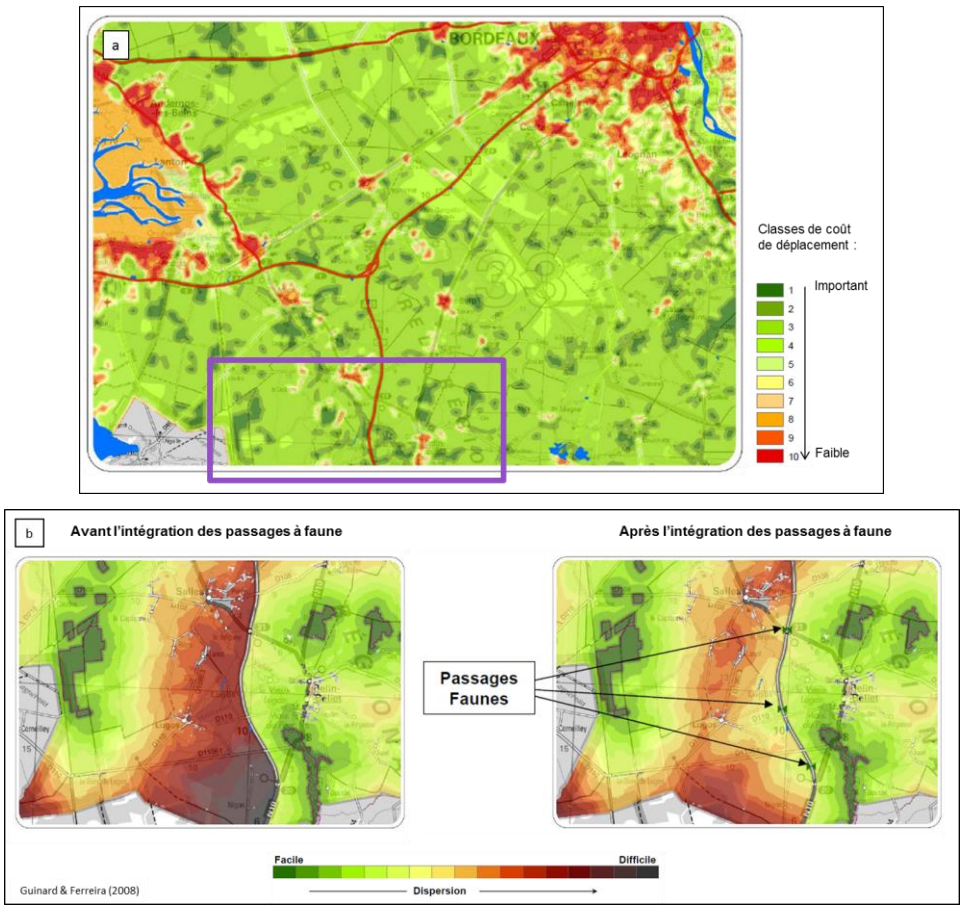


Figure I.28. L'espace de cerf (*Cervus Elaphus*) dans la région de Bordeaux. a) Carte de coût de déplacement, b) zoom (rectangle violet de la carte a) sur des cartes de dispersion à partir de domaines vitaux observés (en grisé), avant et après l'intégration de trois passages à faune (Guinard & Ferreira, 2008). Les passages à faune semblent favoriser la dispersion des cerfs, qui était freinée par la route.

La Figure I.28 montre l'importance de la définition des hypothèses initiales pour créer les cartes de coût au déplacement ainsi que l'enjeu de la précision des données géographiques. Les

hypothèses et les données en entrée se répercutent ensuite dans les résultats de simulation des déplacements de dispersion des animaux. L'estimation des effets d'aménagements sur les espèces animales est fonction de la précision spatiale de l'espace considéré et de l'emprise de la zone concernée.

La modélisation du paysage par coût de déplacement est utilisée dans un contexte de prédiction des déplacements de dispersion. L'enjeu est d'estimer ces déplacements suite à la réintroduction d'espèces ou en présence d'espèces dites invasives. Dans La Morgia *et al.* (2011), le paysage est résumé pour chaque cellule raster en un coefficient de qualité d'habitat pour le cerf (*Cervus elaphus*). Des simulations de déplacements à partir d'un site de réintroduction sont réalisées en prenant en compte le voisinage de proche en proche. La Figure I.29 illustre cet environnement hiérarchisé selon l'habitat et montre deux résultats de simulation de dispersion prenant en compte cet environnement.

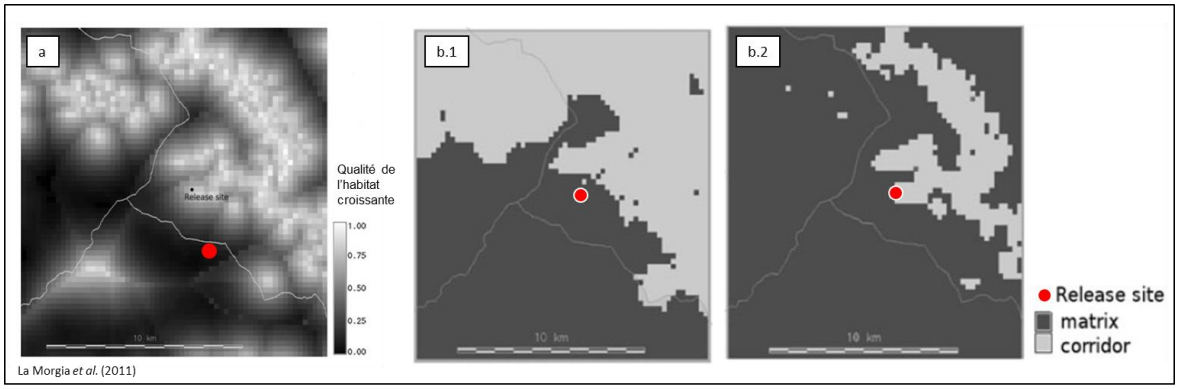


Figure I.29. a) Qualité de l'habitat dans le Piémont italien dans un contexte de réintroduction du cerf, qui tient compte de la topographie, de la végétation, des distances aux routes, rivières et villages. Résultats de simulation de déplacements suite à la relocalisation d'un cerf : identification de corridors de dispersion b1) par approche déterministe (direction vers la cellule au coefficient de qualité d'habitat le plus élevé), b2) par approche probabiliste (la direction prend en compte les directions précédentes) (La Morgia *et al.*, 2011).

L'estimation du coût de déplacement en fonction de la structure de l'espace s'ajoute aux données centrées sur les populations animales et aux caractéristiques de déplacement pour contribuer à définir la densité de population, les lieux de vie connus, la stratégie de déplacement et les activités. Cette approche combinée permet de lancer des simulations de déplacements et d'évaluer la probabilité de présence d'une espèce dans un espace caractérisé.

- Graphes paysagers

Une autre approche de modélisation des coûts de déplacement en fonction de l'occupation du sol utilise la théorie des graphes. Les éléments du paysage sont les composants d'un graphe. Les nœuds sont les unités paysagères correspondant à des habitats dont l'importance peut être pondérée. Les arcs sont les liens entre les nœuds définis. Il est possible d'attribuer des valeurs sur les arcs qui ne dépendent pas uniquement de la distance euclidienne entre deux nœuds. Cette valeur peut être fonction de la présence de milieux intermédiaires et d'obstacles entre deux nœuds. La création de graphes paysagers pour des espèces différentes s'appuyant sur des observations permet de visualiser la fonctionnalité de la connectivité des habitats (Bunn *et al.*, 2000). Foltête *et al.* (2012) ont intégré la modélisation des éléments du paysage par des graphes dans une plateforme d'analyse. L'attribution de l'emplacement des nœuds et des valeurs de distances attribuées aux arcs est laissée au paramétrage afin de pouvoir s'adapter aux espèces et à l'évolution du contexte géographique.

- Représentation des obstacles

La représentation visuelle pour l'analyse du paysage est une thématique de recherche s'appuyant à la fois sur les avancées des techniques de visualisation et de l'écologie. La notion de représentation s'ajoute à la cartographie descriptive de l'espace. Elle a pour objectif de sélectionner et de mettre en avant les aspects significatifs (Fry *et al.*, 2009). Il peut s'agir de symboliser de manière ad hoc le paysage selon sa caractérisation par les écologues : estimation des obstacles, des zones d'habitat, des corridors. Cette visualisation favorise également la communication auprès du public ou la prise de décision en aménagement du territoire. La possibilité de représenter des espaces réels de même que des espaces virtuels est un atout pour planifier des aménagements.
La représentation en 3D offre des vues du territoire intéressantes pour la prise en compte des déplacements. Elle permet de mieux identifier les contraintes du relief combinées avec les autres éléments du paysage : bâtiments et infrastructures avec leurs hauteurs respectives (Tabaka, 2009). La perception d'un utilisateur ou d'un animal est reproduite en tenant compte du sens de déplacement. Dans Hehl-Lange (2001), le paysage est représenté en 3D comme illustré en Figure I.30. Selon les espèces, la caractérisation du paysage est effectuée. Pour le grand murin (*Myotis myotis*), les structures végétales linéaires sont mises en avant par le dessin en trois dimensions des arbres et des haies. Les obstacles physiques au déplacement sont facilement visibles : bâtiment, relief. Les obstacles indirects peuvent également être virtuellement symbolisés, comme l'effet de barrière des routes.

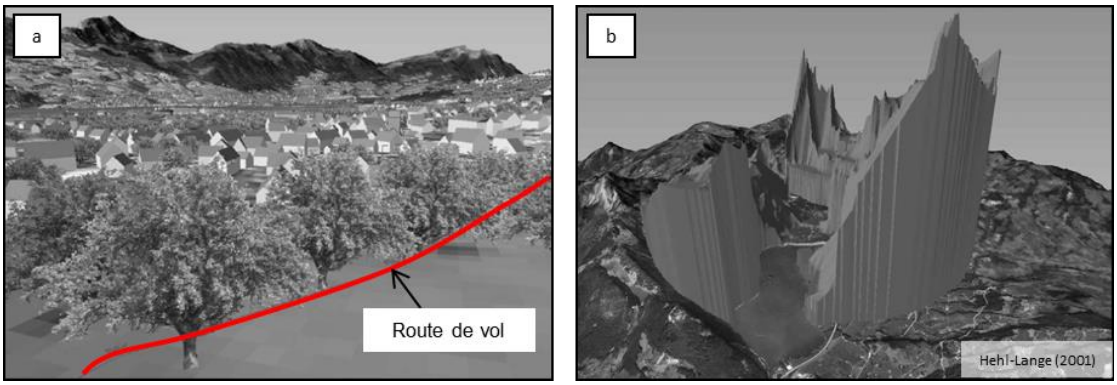


Figure I.30. a) Représentation en 3D de l'espace : identification des routes de vol possibles pour le grand murin entre un site de colonie et un terrain de chasse. b) Mouvements de dispersion possible pour le crapaud commun (*Bufo bufo*) avec la représentation des effets de barrière dans le paysage (Hehl-Lange, 2001).

- Les modèles de marches aléatoires

Les déplacements des animaux font l'objet de comparaisons avec des modèles de déplacements existants. Ces modèles calculent des déplacements théoriques, soit une suite de positions dans le plan, à partir d'équations mathématiques. Plusieurs modèles sont largement utilisés, appelés marches aléatoires (*Random Walk* ou RW) (Codling *et al.*, 2008). Le principe des marches aléatoires est de définir à partir d'une localisation la localisation suivante. Cette définition s'effectue à chaque pas sur deux paramètres principaux : la distance entre les deux localisations et l'angle entre deux directions. Le choix des valeurs de ces paramètres est aléatoire en prenant en compte une distribution mathématique : distribution normale de Gauss, distribution de Cauchy. Les types de distributions de vitesses et de changements de direction déterminent les différents modèles utilisés : marches aléatoires corrélées (*Correlated Randow Walk* ou CRW), ainsi que le modèle du mouvement brownien et les vols de Lévy (*Lévy flight*). Les CRW

définissent les déplacements successifs en prenant en compte les déplacements précédents. Les mouvements browniens et les vols de Lévy modélisent des déplacements de diffusion avec des différences dans la forme de diffusion : par des distances plus uniformes et plus petites pour les mouvements browniens, alors que les vols de Lévy intègrent des grandes distances entre les points (cf. Figure I.31). L'influence de l'espace n'est pas prise en compte dans ces modèles théoriques, et l'intérêt est de pouvoir tester ensuite si sa prise en compte améliore le réalisme des déplacements théoriques par rapport à ceux observés. Les stratégies de déplacements par les individus sont ainsi explorées, qu'il s'agisse d'humains (Torrens *et al.*, 2012) ou d'animaux (Bartumeus *et al.*, 2005).

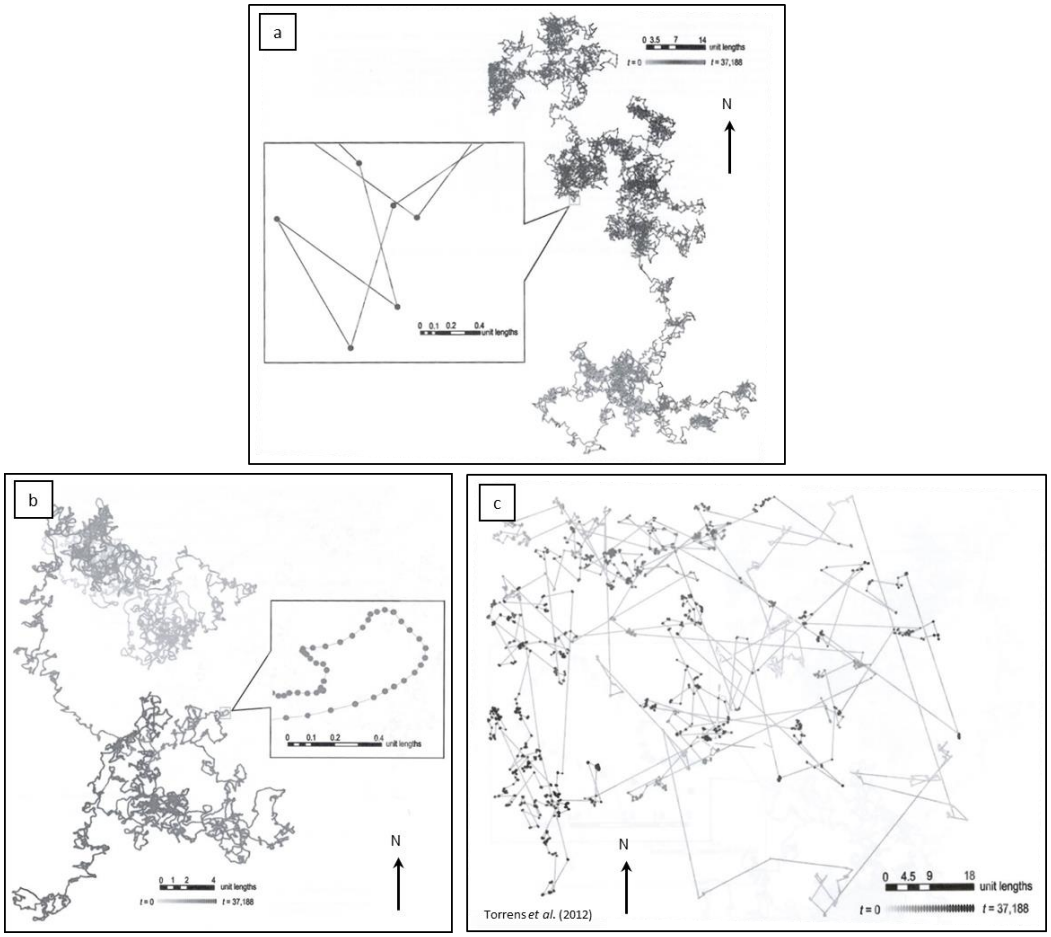


Figure I.31. Simulation de déplacements à partir de 3 modèles : a) marche aléatoire : la distribution des distances entre les points correspondent à une distribution gaussienne, b) mouvement brownien : les distances entre les points correspondent aussi à une distribution gaussienne avec peu de grandes valeurs et les angles de direction sont plus réguliers que dans la marche aléatoire, c) vols de Lévy : les distances entre les points sont moins uniformes que dans les deux modèles précédents, avec davantage de grandes valeurs (Torrens *et al.*, 2012).

Des comparaisons entre résultats générés par le modèle théorique et les observations sont effectuées pour déterminer si les déplacements des animaux sont influencés par des variables extérieures : par exemple d'autres individus (Miller & Maude, 2010), par la saison ou par des paramètres environnementaux (Schwarzkopf & Alford, 2002).

- Modèles géostatistiques

Pour intégrer les contraintes physiques dans les déplacements d'animaux, des modèles géostatistiques sont utilisés. Les méthodes en géostatistique ont pour but de traiter des données

spatialisées. La krigeage permet par exemple d'interpoler des variables à partir de données discontinues. Les données sur la génétique des populations de faune sont propices à l'utilisation de techniques d'interpolation. Le rôle des éléments du paysage dans la répartition des individus peut être recherché à partir d'informations localisées sur les individus. Cosson *et al.* (2006) évaluent la dépendance entre la variabilité génétique des individus et l'espace. Les distances génétiques peuvent traduire la présence d'obstacles limitant les déplacements et par conséquent les rencontres entre individus. Une estimation des frontières entre des populations distinctes peut s'appuyer sur leurs génotypes et également sur les localisations des individus. Ces frontières peuvent ensuite être associées à des barrières géographiques.

L'attraction ou l'évitement de certaines variables environnementales sont explorés à partir d'une modélisation par équations. Un principe souvent utilisé, comme avec les modèles de marches aléatoires, est la comparaison entre des déplacements sans contraintes spatiales et des déplacements sous contraintes spatiales.
Les équations différentielles intègrent comme variables les localisations connues des animaux. Elles permettent d'évaluer l'influence de paramètres sur la trajectoire. Par exemple dans Preisler *et al.* (2004), les distances aux routes, aux zones de ressources, aux cours d'eau et au relief sont estimées comme ayant un effet sur les déplacements des cerfs (*Cervus elaphus nelsoni*). Cette influence est représentée dans une fonction de potentiel pour chacune de ces quatre variables, comme illustrée en Figure I.32 pour la variable du relief sur les cerfs. La représentation des déplacements par vecteur gradient de potentialité de déplacement en tout point de l'espace met en évidence des zones de barrière et des zones de passage privilégiées.

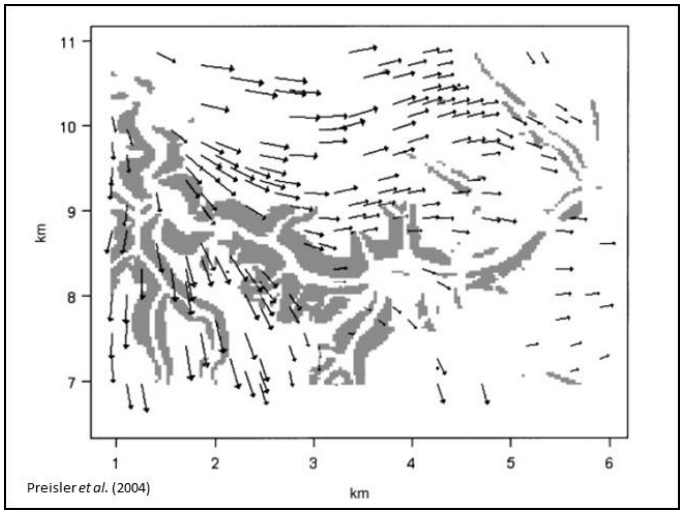


Figure I.32. Représentation de vecteurs de potentialité de déplacement, estimés à partir d'une modélisation de l'influence du relief sur les cerfs lors de leurs déplacements. Les pentes dépassant 40 % (en grisé) correspondent à des vallées encaissées contenant le réseau hydrographique (canyons), et constituent un obstacle aux déplacements (Preisler *et al.*, 2004).

D'autres modélisations utilisent la comparaison entre des segments de déplacements générés aléatoirement et des segments influencés par des variables environnementales (Fortin *et al.*, 2005).

- Caractérisation des zones de contacts et de conflits

Les mesures de préservation de la faune sauvage intègrent non seulement les éléments du paysage mais aussi les activités humaines. On détecte et on analyse le recouvrement spatial entre les lieux de vie et les emplacements d'activités anthropiques. Des zones de contacts sont

identifiées, contacts pouvant représenter des conflits. Les dangers pèsent à la fois sur les animaux et sur les personnes. Une modélisation des facteurs intervenant dans les conflits peut être définie en tenant compte des acteurs et du contexte géographique. Dans Anwar *et al.* (2007), une modélisation agent est proposée afin de réduire les perturbations causées par l'activité touristique d'observation des baleines sur l'estuaire du St Laurent au Québec. Les interactions entre les navires et les mammifères marins sont analysées. Les risques de dérangements et de collisions sont évalués en fonction des caractéristiques du trafic maritime et des comportements des animaux. Braunisch *et al.* (2011) s'intéressent aux pressions exercées par les sports d'hiver sur l'habitat des tétras lyre. Les sites de co-occurrences spatiales entre zones de vie des oiseaux et zones d'emprise des activités touristiques sont recherchés, comme illustré en Figure I.33. Les périmètres de conflits les plus importants sont identifiés, ce qui apporte un éclairage sur la situation pour des mesures ciblées de protection.

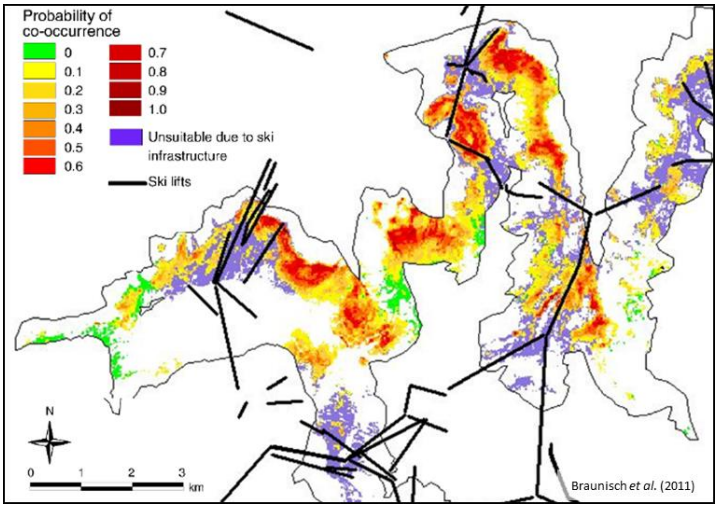


Figure I.33. Identification des zones de conflits potentiels entre les sites d'hivernage des tétras lyre et les activités de montagne dans la région des quatre vallées (contour de la zone d'étude en noir). Les sites d'hivernage du tétras-lyre avec une probabilité faible de co-occurrence avec les activités sportives sont représentées en vert : il s'agit de zones sans activités et éloignées des pistes de ski. Du jaune au rouge foncé, la co-occurrence augmente avec l'intensité des activités humaines. Les zones en violet correspondent aux remontées mécaniques et sont classées comme inadaptées pour les sites d'hivernage (Braunisch *et al.*, 2011).

D'autres travaux portent sur l'identification de points noirs routiers. Il s'agit des zones à forts risques de collision entre la faune sauvage et les véhicules. Les données d'estimation de ces zones font appel à un recensement des animaux morts sur le bord des routes et aux déclarations des collisions auprès des compagnies d'assurance. Des recherches de relations entre le nombre de collisions connues et différentes variables sont menées : occupation du sol longeant les routes, ouvrages de bord de route, période de l'année (Conruyt-Rogeon & Girardet, 2012). La Figure I.34 est une cartographie de la densité des collisions pour le chevreuil et pour le renard en Franche-Comté le long des routes prospectées. L'indice de Ripley est calculé : il caractérise la densité des points, ici le long du réseau routier, en prenant en compte les distances respectives entre les lieux de collisions.

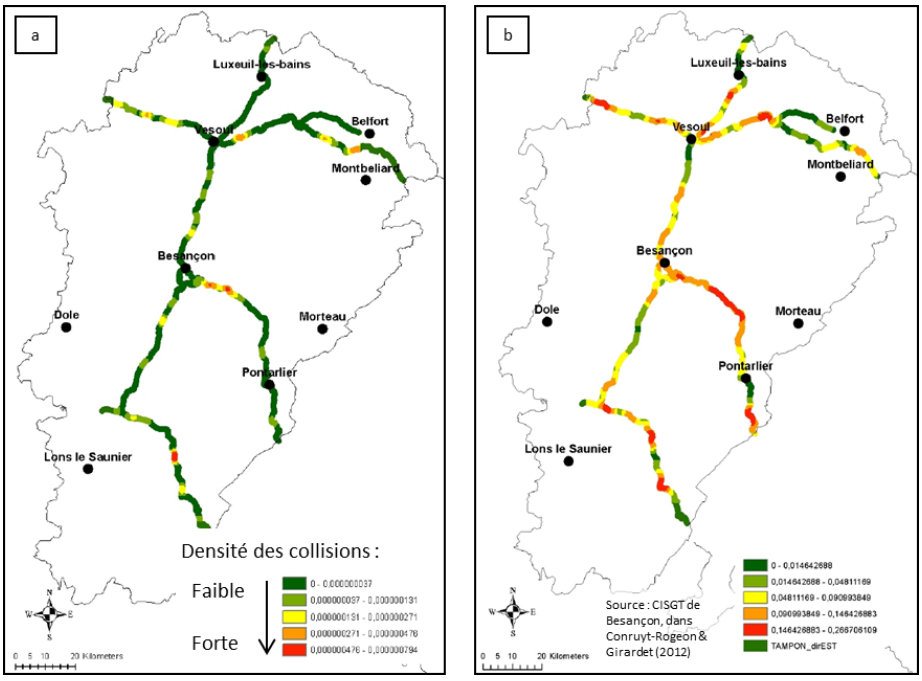


Figure I.34. Cartographie par l'indice de Ripley de la répartition des points de collisions entre les véhicules et les chevreuils (a) ou les renards (b) sur les routes nationales de Franche-Comté (Conruyt-Rogeon & Girardet, 2012). Le nombre de collisions est 2,5 fois plus élevé pour les renards que pour les chevreuils, les renards étant plus mobiles et se déplaçant sur de plus grandes distances. La superposition des cartes par espèce permet d'identifier des points de conflits importants sur le réseau : la majorité des collisions a lieu en milieux boisés.

Des modèles cherchent à prédire les conflits en s'appuyant sur la connaissance des densités des populations animales locales, l'intensité du trafic, les variables environnementales autour des zones de collisions (Finder *et al.*, 1999 ; Langen, 2009).

Les modélisations de l'espace sont multiples pour étudier et évaluer les effets du paysage et de l'environnement sur les déplacements de la faune sauvage. Les choix de formalisation de l'espace dépendent des données existantes et des informations récoltées. La modélisation de l'espace et des comportements de la faune fournit ensuite une aide aux prises de décisions en aménagement du territoire.

2.2.3. La mise en place de mesures de protection de la faune sur le territoire

L'identification des besoins de préservation de la faune est accompagnée d'analyses des paysages et des dynamiques qui s'y produisent. Certaines approches ont pour point de départ le paysage, d'autres les déplacements d'animaux. Elles associent les informations afin de formaliser les comportements de la faune et les relations entre leurs déplacements et les éléments du paysage. Les modifications du paysage dues à des aménagements par l'homme occasionnent des changements dans les composantes des écosystèmes. Ces effets sont évalués à partir de connaissances déduites d'observations et par les méthodologies présentées précédemment. Les applications sur le terrain de mesures de préservation de l'environnement répondent à deux types de besoins :

- besoin d'amélioration : la motivation est la préservation de la faune en partant de l'état actuel du territoire. D'un point de vue de la mobilité de la faune, le but est alors de favoriser les déplacements ;

- besoin correctif : suite à des constructions – bâti, routes –, il s'agit de limiter les conséquences négatives des effets de barrière aux déplacements, conjointement à ceux de la perte d'habitat.

Nous reprenons cette distinction des besoins pour présenter des aménagements mis en place en faveur de la faune.

Les aménagements en faveur des déplacements de faune

On distingue deux types d'aménagement : d'une part, les mesures environnementales issues des politiques publiques dans le cadre de la gestion du territoire à plusieurs échelles spatiales et administratives, d'autre part des aménagements locaux visant à pallier les effets négatifs d'infrastructures anthropiques.

- Les mesures de préservation et de restauration sur le territoire

Les aménagements pour favoriser les déplacements s'inscrivent dans les politiques publiques environnementales. L'approche par le maintien des continuités d'habitats complétés de corridors de déplacement est à présent privilégiée. Sur le territoire national, les rencontres du Grenelle de l'Environnement en 2007 ont abouti à des mesures de préservation de l'environnement. Celle concernant la définition de la Trame verte et bleue s'attache à restaurer les continuités écologiques en s'appuyant sur des zones protégées et des liens entre elles[14]. La mise en œuvre de la Trame verte et bleue (TVB) a débuté par des études de recensement des zones d'intérêt pour les espèces végétales et animales, dites « réservoirs de biodiversité », et qui peuvent correspondre à des espaces protégés. Puis des corridors reliant les zones d'intérêt sont identifiés. La Figure I.35 est la carte de la TVB identifiée pour la région Nord-Pas de Calais.

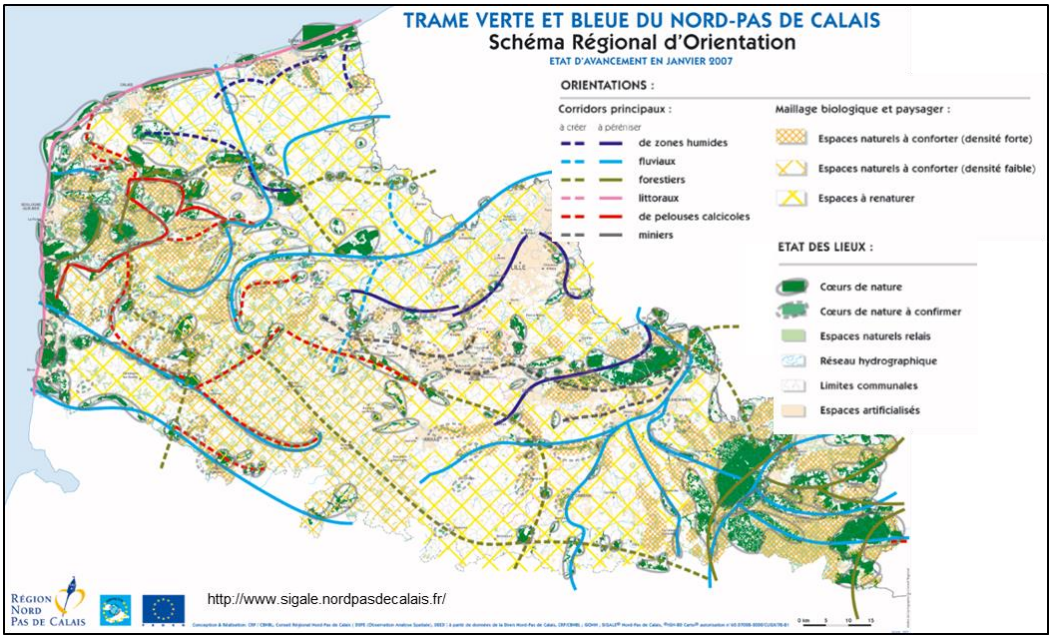


Figure I.35. Cartographie de la Trame verte et bleue pour la région Nord-Pas de Calais : état des lieux et orientations, [http://www.sigale.nordpasdecalais.fr/].

La description actuelle, ou l'« état des lieux », réunit les zones d'intérêt existantes. L'identification des réseaux écologiques est séparée entre les corridors « à pérenniser » et les corridors « à créer ». La détermination des corridors s'effectue par une approche cartographique

[14] Site Web : [http://www.trameverteetbleue.fr/]

présentée précédemment avec l'identification des zones caractérisées selon leur intérêt pour les animaux, elles-mêmes issues d'observations. La représentation des corridors « à créer » ou « à pérenniser » sur l'ensemble d'une région apporte une vision globale des enjeux environnementaux d'un territoire correspondant à l'unité administrative de la région Nord-Pas de Calais. Des actions peuvent ainsi être plus facilement être mises en place.

La TVB s'articule à trois échelles : au niveau local par les collectivités territoriales, au niveau régional en cohérence avec les SRCE (Schéma régional de cohérence écologique) et les SDAGE (Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux) puis au niveau de l'ensemble du territoire via des orientations nationales. Le cadre et les définitions sont donc nationaux mais la mise en œuvre est locale. L'objectif de la TVB est d'identifier localement les modifications du paysage dont l'effet serait positif ou négatif pour les espèces. Le ministère en charge de l'environnement définit la TVB comme « un outil d'aménagement du territoire qui vise à (re)constituer un réseau écologique cohérent, à l'échelle du territoire national, pour permettre aux espèces animales et végétales, de circuler, de s'alimenter, de se reproduire, de se reposer... En d'autres termes, d'assurer leur survie, et permettre aux écosystèmes de continuer à rendre à l'homme leurs services »[15]. Les aménagements visent à assurer une continuité d'habitats et des possibilités de déplacements pour les espèces. La traduction en termes d'aménagement correspond à la préservation ou à la mise en place de réseaux par grands types de milieux par exemple forestier, humide, aquatique. Le but est d'assurer la continuité au sein de chacun des milieux et de les combiner. Plusieurs types d'aménagements peuvent se révéler pertinents tels des ajouts de haies et de structures linéaires végétales. La Figure I.36 illustre les aménagements prévus dans la cadre de la restauration de continuités écologiques. Si les planifications cohérentes peuvent être menées à un niveau national et régional, la mise en œuvre des aménagements s'effectue localement par des modifications ponctuelles de l'espace.

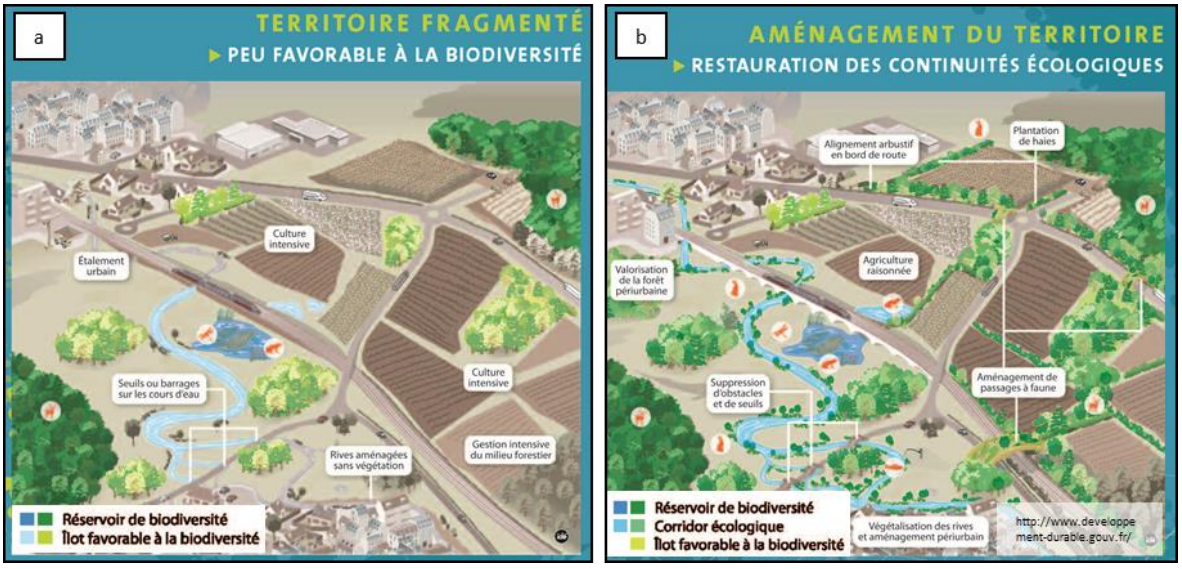


Figure I.36. Des applications de la Trame verte et bleue en aménagement du territoire. La partie (a) est le territoire initial, la partie (b) est celui estimé après la restauration de continuités écologiques pour les espèces animales et végétales. On note que la plupart des aménagements sont ponctuels et correctifs. Ils ne remettent pas en question les choix d'occupation du sol, sauf en milieu périurbain avec la « valorisation de la forêt périurbaine », [http://www.developpement-durable.gouv.fr/].

[15] Source : [http://www.developpement-durable.gouv.fr/-La-Trame-verte-et-bleue,1034-.html]

En France, la première phase d'identification des réseaux s'est déroulée jusqu'en 2013. Des décrets ont été adoptés sur la création d'un comité national et des comités régionaux « Trame verte et bleue » en juin 2011. Ce comité suit la concrétisation des résultats en aménagements du territoire. Des politiques d'aménagement du territoire intégrant la préservation des continuités écologiques sont mises en œuvre dans plusieurs pays (Bennett & Mulongoy, 2006). La Pologne a intégré le réseau EECONET pour la mise en place d'un réseau écologique national, cohérent à l'échelle de l'Europe (Liro *et al.*, 1995 ; Pavard, 2006). En Suisse également, la « Stratégie pour un réseau écologique national » est d'approche similaire (Berthoud *et al.*, 2004). La Figure I.37 est un tableau résumant par type d'occupation du sol la valeur bioindicatrice des espèces. Cette valeur indique si l'espèce permet d'évaluer la qualité du milieu, qualité potentiellement favorable à d'autres espèces. L'approche par espèce illustre le fait que les animaux ont des besoins particuliers et exploitent une configuration paysagère précise, motivant leur déplacement et les orientant.

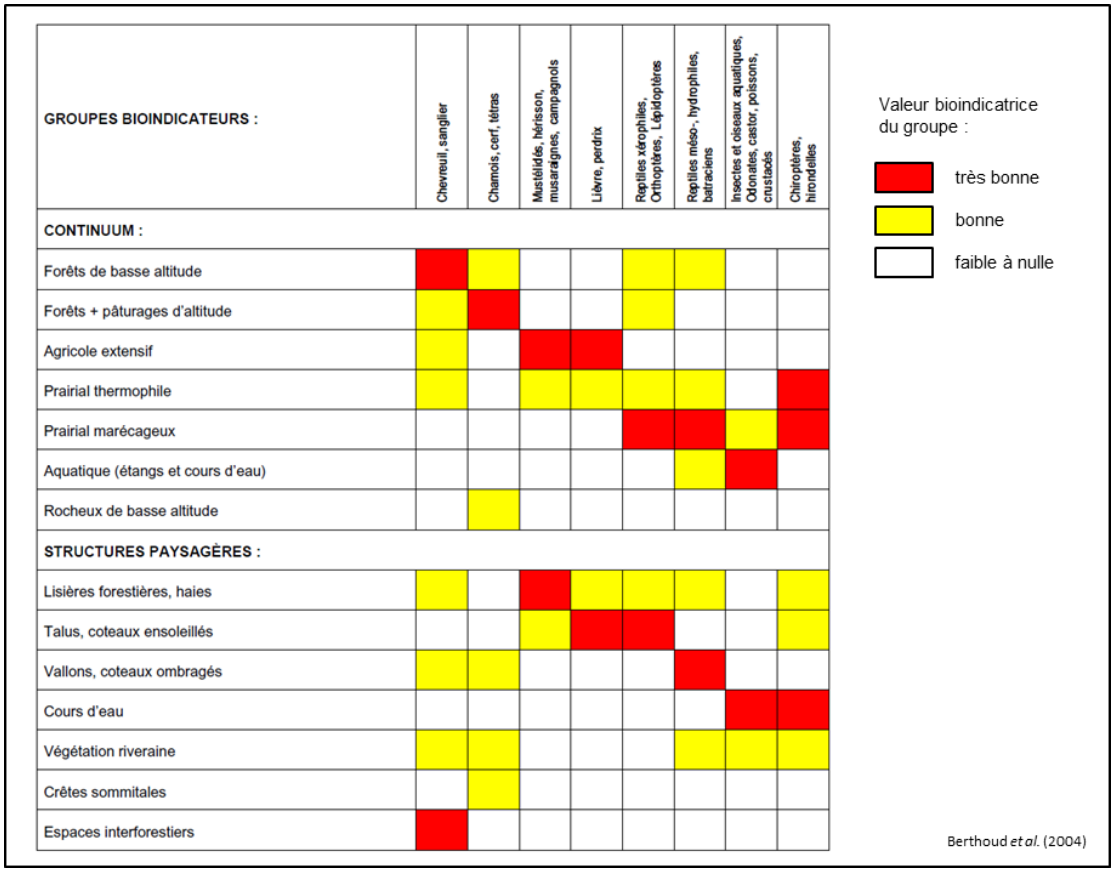


Figure I.37. Connaissances formalisées sur les espèces et leur relation à différents milieux : exemple en Suisse avec une hiérarchisation des valeurs bioindicatrices par espèce par rapport aux éléments présent dans un réseau écologique (Berthoud *et al.*, 2004).

Au niveau européen, il existe un réseau des sites Natura 2000. Ces sites recouvrent une emprise géographique européenne et concernent différents milieux. La création d'un site a pour but d'assurer la protection de certaines espèces (oiseaux ou autres espèces animales et végétales remarquables). Cela implique de limiter la perturbation des habitats en favorisant des pratiques agricoles dites durables et le contournement de projets d'infrastructures.

La mise en relation de plusieurs aires protégées dépasse les limites des États nationaux. Plusieurs parcs transfrontaliers ont été fondés à partir de parcs nationaux existants. La démarche

permet de mettre en commun les ressources naturelles et les modalités de gestion. Elle amène à réduire le nombre d'obstacles à la circulation des espèces par la suppression de barrières. En Afrique par exemple, le parc du Grand Limpopo réunit des parcs du Zimbabwe, du Mozambique et d'Afrique du Sud. Le parc du W est géré par le Bénin, le Burkina Faso et le Niger. Pour la grande faune notamment, cela permet un élargissement de leur territoire et une répartition plus équilibrée des pressions exercées sur les ressources. Les animaux à fort impact sur l'environnement et nécessitant des larges territoires, ou ceux effectuant de longues migrations, sont particulièrement concernés. C'est le cas des troupeaux d'herbivores dont les éléphants (Balfour *et al.*, 2007). Rabinowitz & Zeller (2010) ont étudié la connectivité des paysages et ont identifié des corridors d'habitat favorable pour le jaguar (*Panthera onca*) (cf. Figure I.38) entre les zones protégées. Ce type d'étude montre l'importance de l'identification des espaces à préserver en fonction du comportement des espèces : distances de déplacement, spécificité des habitats, conflits avec les activités humaines.

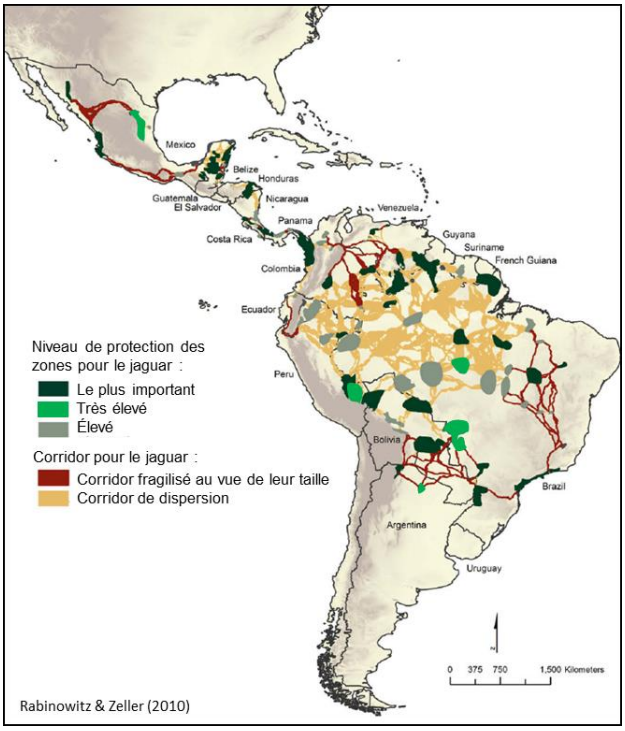


Figure I.38. Zones d'habitat à préserver et identification de corridors pour les jaguars en Amérique latine (Rabinowitz & Zeller, 2010).

La détermination et la délimitation des zones sont porteuses de forts enjeux quant à l'insertion des sociétés. L'opposition entre la nature et la culture n'est aujourd'hui plus aussi franche. Les réglementations intègrent la protection de pratiques agro-pastorales « responsables ». Aussi les chartes des PN (parcs nationaux) et des PNR (parcs naturels régionaux) cherchent à concilier activités économiques et intégrité des écosystèmes. Parfois, ces deux objectifs peuvent être contradictoires comme par exemple la protection des grands prédateurs et le maintien des élevages traditionnels. La TVB cristallise l'approche par recommandation de gestion durable des écosystèmes et confirme à ce titre son rôle d'outil d'aménagement du territoire. Ses effets risquent toutefois d'être limités puisque les mesures associées à la TVB ne sont pas opposables juridiquement, elles ne sont que des recommandations (Camproux-Duffrène & Lucas, 2012).

- Les aménagements locaux compensatoires

Certains changements du paysage ont des conséquences négatives sur la faune, notamment lors de constructions ayant un effet de barrière sur les déplacements. Pour pallier les coupures dans et entre les habitats, des passages à faune ont été proposés. Il s'agit d'aménagements aidant à la traversée d'infrastructures linéaires par la faune sauvage. Ils se présentent sous diverses formes – tunnel ou pont – et sont adaptés aux espèces concernées – espèces terrestres ou dépendantes des zones humides. Un vocabulaire spécifique désigne les passages à faune ou écoducs : crapauducs, écureuilloduc, échelle à poissons. Ils peuvent localement diminuer les effets négatifs des routes, lors des migrations d'amphibiens par exemple. Dans les milieux arboricoles, des passages à faune intégrés dans la canopée semblent adaptés. Ils sont utilisés par les espèces se déplaçant dans les arbres comme par certains opossums (Soanes & Van Der Ree, 2009). Les passages peuvent se situer à différentes hauteurs par rapport au sol : au-dessus via des passages arboricoles ou des structures de pont, ou en-dessous via des tunnels. Dans Sétra (2006), les recommandations sur les tronçons autoroutiers sont une distance de 300 m entre chaque passage pour la petite faune et tous les 2 km entre les passages à grande faune en milieu boisé ou densément peuplé par les animaux. Les passages peuvent être mixtes, c'est-à-dire associés à des voies de circulation réduites comme des sentiers piétons ou réservés à une desserte locale. La Figure I.39 associe une carte avec l'emplacement d'un passage à faune et sa photographie. Outre le fait de faciliter les déplacements, ces installations ont également vocation à réduire les collisions. En effet, les collisions entre véhicules motorisés et faune sauvage le long des axes routiers peuvent se regrouper en certaines zones et la construction de lieux de traversée est bénéfique aux points noirs (Conruyt-Rogeon G. & Girardet, 2012) (Ramp *et al.*, 2005).

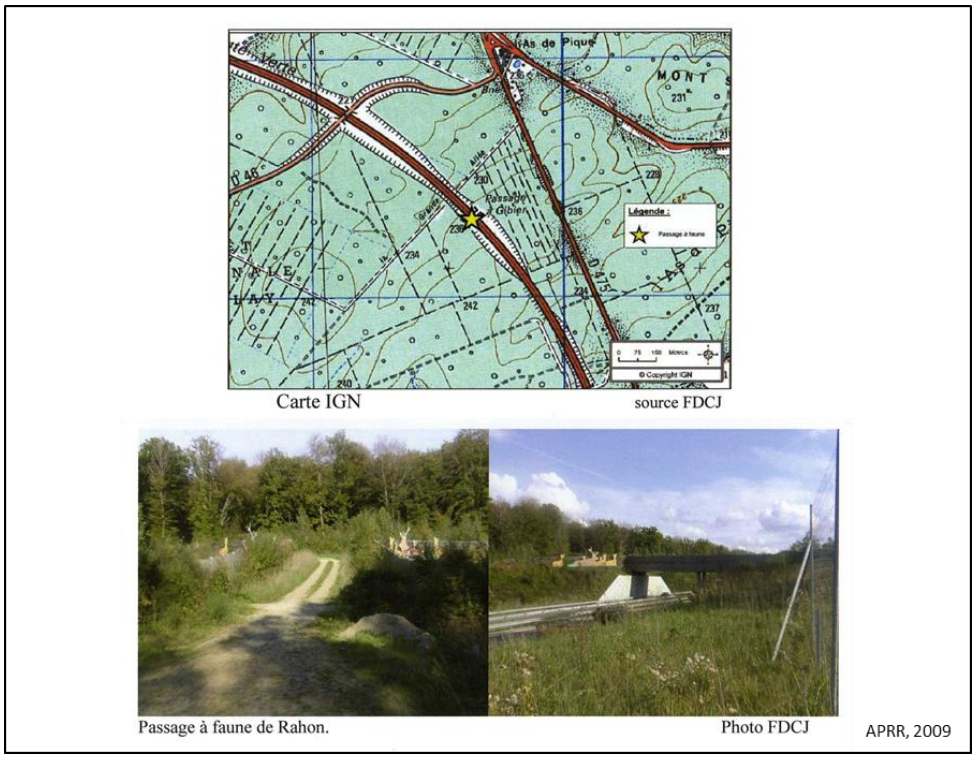


Figure I.39. Carte de l'emplacement d'un passage à faune associé à un chemin forestier et photos de la construction (APRR, 2009).

Les passages à faune ont démontré une certaine efficacité dans la préservation des espèces soumises à une mortalité élevée par collision. C'est par exemple le cas des blaireaux au Pays-Bas

(Van Bohemen, 1998) (Bourgeois *et al.*, 2005). Van der Ree *et al.* (2009) constatent une réduction de la mortalité chez l'opossum nain des montagnes (*Burramys parvus*) en Australie suite à la mise en place de passages à faune. Pour certaines espèces, d'autres aménagements peuvent être installés ou améliorés. Selon Meunier *et al.* (2000), les nuisances induites par les routes sur les rapaces sont compensées par l'utilisation de perchoirs et de bordures végétalisées le long de ces infrastructures. Des mesures peuvent également limiter les perturbations dans les habitats : circulation des randonneurs restreintes aux sentiers, aires de protection stricte. Le comportement de certains animaux s'adapte si les perturbations sont limitées : distances de fuite plus petites, fréquentation des lieux à des heures correspondant à une présence humaine faible (Ramousse *et al.*, 1999).

Les aménagements compensatoires comme les passages à faune n'ont néanmoins pas toujours une efficacité avérée, de même que la restauration de milieux. Les aménagements pour le renforcement de la connectivité par des haies ou la reconstruction artificielle des milieux (vaporisation mécanique pour reconstituer la brume d'une cascade par exemple), ne compensent pas totalement les modifications des habitats. Le faible nombre d'observations et la courte durée des études limitent la portée des conclusions de ces études (Davies & Pullin, 2007 ; Corlatti *et al.*, 2009), comme nous allons le voir dans le paragraphe suivant.

L'évaluation des effets des aménagements pour la faune

L'aménagement du territoire entraîne des conséquences sur les écosystèmes. En particulier, cela entraine des changements paysagers agissant sur la présence des espèces par des modifications de l'occupation du sol, et sur leurs déplacements par des effets de barrière ou de corridor. Une évaluation efficace des aménagements suppose de comparer un état antérieur et un état a posteriori, et est plus aisée pour une seule structure que pour un ensemble d'aménagements. Par exemple pour les passages à faune, les évaluations peuvent porter sur l'estimation des animaux circulant dans le passage. Des pièges à empreintes permettent de déterminer les espèces ayant emprunté le passage et d'estimer l'abondance des animaux. Pour de plus petits animaux, des pots pièges sont utilisés pour un recensement régulier. Ces évaluations sont efficaces pour des structures localisées. Elles servent également lors de l'évaluation de bouleversements importants et sur un grand territoire. Cependant, l'évaluation des effets positifs ou négatifs de ces aménagements s'inscrit dans la durée et demande des moyens importants. Des observations fréquentes et constantes sont nécessaires pour apprécier les évolutions (Voser & Brauchli, 2005). Les techniques de suivi présentées précédemment permettent en partie de suivre ces évolutions.
La difficulté des évaluations réside également dans l'appréciation des effets des aménagements. Les espèces ne réagissent pas toutes de la même manière aux constructions anthropiques et des conséquences négatives ou imprévues peuvent apparaître. Des espèces peuvent être favorisées par rapport à d'autres. Les aménagements favorisant les déplacements sont a priori positifs pour les espèces car celles-ci sont moins soumises à la fragmentation de leur habitat et aux barrières à leurs déplacements.

Nous avons évoqué plusieurs cas dans lesquels la configuration paysagère favorise les déplacements, éventuellement suite à la mise en œuvre d'aménagements. Par exemple, la préservation de lisières et de structures linéaires de végétation est favorable à la présence et aux déplacements de certaines espèces. La fragmentation des zones boisées peut favoriser certaines espèces de lisière, comme plusieurs espèces de chiroptères citées par Ethier & Fahrig (2011).

D'autres phénomènes peuvent entraîner un déséquilibre des écosystèmes.

- La conquête de nouveaux territoires est effectuée par des espèces considérées comme invasives. Ces espèces peuvent avoir été dans un premier temps déplacées par des vecteurs anthropiques. Certaines entrent en concurrence avec des espèces locales, lesquelles sont pénalisées (McGeoh *et al.*, 2010). Plusieurs espèces animales sont suivies en France, entres autres : le vison d'Amérique (*Neovison vison*), la fourmi d'Argentine (*Linepithema humile*), l'écrevisse de Louisiane (*Procambarus clarkii*). Il en est de même pour les espèces végétales. Des changements dans l'environnement font entrer en concurrence des espèces : par exemple, le renard polaire (*Vulpes lagopus*) voit son aire d'occupation diminuer au profit du renard roux (*Vulpes vulpes*) avec le réchauffement de température (Woodward & Beever, 2011).
- Les corridors en faveur des déplacements peuvent accélérer la propagation de maladies. Les zoonoses (maladies pouvant se transmettre à l'homme par les animaux et inversement) sont des préoccupations récurrentes dans la société et à une échelle planétaire.
- Certains aménagements favorisent de manière inattendue les déplacements. Par exemple certains animaux peuvent se déplacer plus facilement sur ou le long d'infrastructures linéaires telles des routes qui représentent dans ce cas des corridors. Cette utilisation peut également favoriser la prédation aux dépens d'autres espèces, comme le loup par rapport au caribou (Stotyn *et al.*, 2005). Cependant les passages à faune aménagés sont rarement mis en cause dans des cas de prédation (Little *et al.*, 2002).
- Les corridors de végétation favorisent les déplacements des animaux le long des routes et facilitent les traversées. Ils peuvent de manière collatérale, accroître le nombre de collisions entre la faune et les véhicules (Finder *et al.*, 1999).

Les conséquences des aménagements du territoire sur la faune peuvent être difficiles à évaluer. Pour faciliter cette évaluation, il faudrait envisager un suivi de la faune sur le long terme. Les suivis et les études dans le cadre des aménagements sont à relier aux expertises environnementales et écologiques. Un projet peut avoir des conséquences en cascade qui modifient définitivement les écosystèmes. Nous nous positionnons par rapport à l'état de l'art effectué sur les connaissances de la faune et de ses déplacements ainsi que sur l'intégration de ces connaissances en aménagement du territoire.

3) LA MODÉLISATION DE L'ESPACE ET DES DÉPLACEMENTS DE LA FAUNE : PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS DE LA THÈSE

Nous formulons notre problématique et nos objectifs concernant la prise en compte de l'espace géographique dans les analyses de déplacements de la faune. Nous avons présenté un état de l'art sur la place de la faune dans les préoccupations sociétales et nous nous sommes concentrée sur les études menées afin de mieux connaître et comprendre le comportement spatial des animaux. L'identification des enjeux de cette thèse et sa mise en œuvre s'appuient en partie sur cette bibliographie.

3.1. La caractérisation de l'influence de l'espace sur les déplacements d'animaux à partir des données existantes : définition de la problématique

3.1.1. Intérêts de la compréhension des déplacements de la faune sauvage

Les recherches et les travaux menés sur les déplacements de la faune sont liés à des interrogations sur le comportement animal ainsi que sur la gestion de la faune par la société. L'amélioration de la connaissance sur les comportements des animaux concerne plusieurs domaines scientifiques :

- la dynamique des populations : la compréhension des relations sociales et hiérarchiques, des réseaux trophiques, du rôle de la faune dans les écosystèmes :
- les sciences cognitives, notamment la compréhension des mécanismes psychologiques de représentation de l'espace, de résilience et d'adaptation à des modifications intrinsèques ou extérieures ;
- l'épidémiologie que ce soit pour la prévention de zoonoses ou la limitation des maladies du bétail et de la faune sauvage.

Ces connaissances scientifiques principalement centrées sur les animaux, peuvent être associées aux problématiques des études en sciences sociales et en aménagement du territoire. L'environnement spatial y est pris en compte. Il est composé des éléments du paysage et intègre également la présence humaine et les manifestations anthropiques. Nous pouvons classer les interactions entre la société et la faune sauvage selon la simultanéité de présence des hommes et des animaux et selon l'intention de rencontre.

1) La présence d'hommes et celle d'animaux peuvent avoir lieu à un même endroit et à un même instant de manière non intentionnelle. Cette présence simultanée concerne particulièrement les espèces présentes dans les zones densément occupées par l'homme comme les villes. Les rencontres peuvent avoir des conséquences sur les individus (hommes et animaux). Elles peuvent modifier les comportements respectifs, notamment par des mouvements d'éloignement (fuite) ou de rapprochement (attrait d'une ressource alimentaire). Elles peuvent atteindre l'intégrité physique des individus par exemple lors des collisions entre véhicules et animaux.
2) Les rencontres avec la faune sauvage sont aussi intentionnelles. Les séances d'observation et la chasse sont des pratiques lors desquelles les hommes cherchent à identifier la localisation d'animaux (Beringer *et al.*, 1990 ; Benhaiem *et al.*, 2008).
3) Même si la rencontre entre hommes et animaux n'est pas effective, le partage d'un même espace à des moments décalés entraîne des interactions comme vu dans l'état de l'art. Les animaux agissent sur leur environnement spatial par la consommation de ressources ou

par des actions sur les éléments du paysage. L'ensemble de ces influences peuvent correspondre à des pressions ou au contraire à des facteurs favorisant le bon fonctionnement des écosystèmes : dispersion de graines, pollinisation, action dynamique de labourage ou d'éclaircissement. Outre les éléments du paysage pouvant être qualifiés de « naturels », les animaux peuvent agir sur les infrastructures anthropiques. Nous pouvons mentionner des exemples aussi divers que la destruction des clôtures effectuée entre autres par les sangliers, l'atteinte des charpentes par les termites et les dégâts provoqués sur les ressources forestières ou les cultures dus aux grands herbivores comme les éléphants. L'interaction entre espace et animaux est valable dans les deux sens. L'influence de l'environnement sur les animaux s'observe rien que par la présence des espèces en fonction des types de milieux. L'environnement spatial correspondant à différents degrés d'anthropisation provoque une adaptation du comportement et des déplacements des animaux.

Les questionnements sur les interactions entre la faune sauvage et leur environnement recouvrent des problématiques plus larges, en particulier sur la vision et la gestion de la nature dans les sociétés actuelles. Nous nous intéressons dans le cadre de cette thèse à un aspect précis des interactions entre faune et environnement, à savoir l'influence de l'espace sur ses déplacements. Notre problématique concerne la prise en compte de l'espace géographique dans l'étude des déplacements de la faune. Nous souhaitons savoir par où passent les animaux et ce qui entrave ou favorise leurs déplacements, et dans quelle mesure les aménagements du territoire influencent ces déplacements. Nous abordons cette problématique à travers la question de l'ingénierie des données, données géographiques et données sur la faune. Nos interrogations portent sur la possibilité d'identification de relations entre des déplacements et des éléments du paysage, puis sur la définition d'une modélisation pertinente de l'espace tel qu'il est perçu par les espèces.

Cette problématique touche à plusieurs domaines de recherche. De par les objets d'étude et les questionnements, elle aborde les thématiques de la géographie, de la géomatique ainsi que de l'écologie. Le sujet est transversal à ces disciplines. Il se concentre sur les déplacements d'animaux, ce qui implique de s'intéresser à leur comportement et à leur occupation de l'espace. Le sujet se rapporte précisément à l'action de déplacement, ou plutôt à la mobilité si l'on veut ôter l'ambigüité du terme déplacement et inclure les rythmes liés aux vitesses de déplacements et aux arrêts. Il s'agit ici d'une écologie de la mobilité (Nathan *et al.*, 2008 ; Holland *et al.*, 2009). La notion d'espace et sa caractérisation sont centrales. Le type d'influence qu'ont les éléments du paysage sur les déplacements est au cœur de la problématique : évitement, attraction, neutralité.

Les chemins empruntés par les animaux sont connus via des localisations enregistrées, avec une précision et une étendue variable. La description de l'espace est réalisée à partir de bases de données géographiques. Les données géographiques sont une simplification légèrement erronée de la réalité. Même dans le cas de photographies aériennes, la vision verticale, la résolution et les facteurs atmosphériques altèrent l'image disponible du terrain. Par exemple, l'épaisseur ou la stratification des éléments du paysage ne sont pas accessibles, seule la surface supérieure est visible. La Figure I.40 illustre les différences entre le monde réel et les représentations dans des bases de données géographiques. Nous nous intéressons à la représentation de l'espace géographique parce que nous souhaitons disposer d'un module numérique des déplacements d'animaux qui intègre les déplacements observés et les données géographiques qui représentent la réalité.

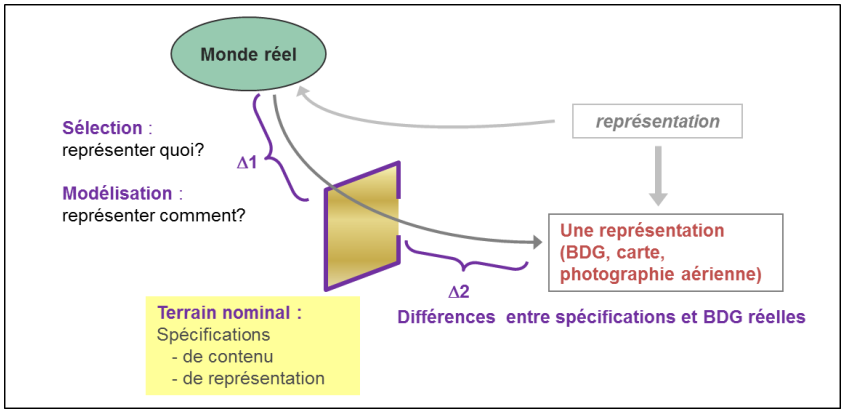


Figure I.40. Monde réel, terrain nominal et représentation : différences et questionnements, d'après Ruas (2013).

L'identification des obstacles aux déplacements et des lieux de passages dépendent des spécifications des données. Il est question d'analyser des phénomènes à partir de données géographiques et plus largement de données localisées. La prise en compte de la qualité des données est à considérer dans l'étude des déplacements. La grande quantité de données produites actuellement offre de multiples possibilités d'analyse et de cartographie de phénomènes spatio-temporels d'où l'interrogation : la compréhension des phénomènes est-elle immédiate à partir des données produites malgré des représentations imparfaites de l'espace et des déplacements ? Il s'agit de déterminer dans quelle mesure les données de description de l'espace sont suffisantes pour caractériser l'influence des éléments du paysage sur les déplacements d'animaux compte-tenu de leurs caractéristiques biologiques et comportementales.

La diversité des questionnements posés implique le recours à des connaissances dans des différents domaines. Selon les disciplines, l'espèce est appréhendée de façon différente, avec un vocabulaire spécifique. Les études en environnement font souvent appel à plusieurs domaines de connaissances. Elles croisent des observations et des analyses tant en sciences humaines, en écologie, en climatologie, en géographie physique. Nous avons vu que l'étude des déplacements de la faune sauvage fait intervenir un état de l'art diversifié qui concerne les thématiques et les méthodologies. Cependant l'intérêt des problématiques transversales repose sur leur champ d'application. Ainsi la problématique énoncée a des répercussions sur les aspects suivants :

- l'environnement au sens large du terme et la préservation des espèces en particulier. La compréhension des déplacements enrichit les connaissances sur l'utilisation de l'espace par les animaux et sur leur rythme de vie ;
- les effets d'aménagement de l'espace par la société humaine. Les modifications de l'environnement d'origine anthropique provoquent souvent des conséquences sur le paysage ainsi que sur la flore et la faune, elles-mêmes interagissant entre-elles ;
- la gestion des interactions entre les hommes et les animaux et plus largement entre la société et la nature. Les situations de conflit concernant la faune sauvage vont souvent au-delà des rencontres simultanées entre les animaux et les hommes à un même lieu. Les sources d'opposition concernent plus souvent l'exploitation de ressources communes ou la dégradation collatérale d'une ressource exploitée par les hommes.

Les interactions entre les hommes et les espèces animales s'effectuent souvent par l'intermédiaire de l'espace. Le partage d'une même zone géographique avec des besoins et des

exploitations potentiellement opposés entraîne des modifications du territoire qui ne sont pas anodines. Nous cherchons à déterminer une modélisation des éléments du paysage et des déplacements qui permette d'aider à la compréhension des dynamiques du territoire. Par exemple pour la gestion des situations de conflits entre animaux et hommes, des aménagements sont planifiés à différentes échelles. À un niveau local, les actions peuvent consister en des solutions d'éloignement. Le nourrissage et l'installation de points d'eau permettent d'orienter les animaux à l'écart des lieux d'interactions (MEEDDM, 2009). La gestion s'effectue également à un niveau global par le biais de politiques publiques. Les conséquences des changements dans le territoire sont évaluées, ce qui permet ensuite d'optimiser l'emplacement et la forme des infrastructures et la détermination de certaines zones à protéger.

Les questions de l'équilibre entre développement économique souvent associé à l'idée de progrès, et de la préservation des espaces naturels restent ouvertes. De nouvelles infrastructures comme les autoroutes ou des lignes ferroviaires à grande vitesse sont vues comme des vecteurs de dynamisme économique et sont à ce titre soutenus par les acteurs locaux (APRR, 2007). Les effets sur les écosystèmes peuvent paraître secondaires notamment si l'on considère que la création de richesses permet ensuite de mieux préserver la biodiversité. Il en va de même pour les activités touristiques qui peuvent être considérées comme destructrices de milieux ou au contraire support d'une prise de conscience pour les visiteurs et génératrices de fonds. Les nouveaux aménagements comme les constructions d'infrastructures provoquent souvent des oppositions d'opinions. C'est par exemple le cas en France de l'actuel projet d'aéroport du Grand Ouest qui illustre les tensions relatives au sujet des choix d'évolution et de développement d'un territoire.
Il ne s'agit pas ici de déterminer quelles sont les meilleures décisions à moyen et long termes. Notre ambition se borne à une analyse du territoire, des phénomènes qui s'y déroulent et à une évaluation prédictive des effets de futurs aménagement, sans prétendre répondre à ces questions de choix de sociétés. Cependant, pour tenter d'évaluer les effets des modifications du paysage sur les déplacements des animaux, il demeure nécessaire de disposer de données et de méthodes. Ces données concernent les déplacements, à grande résolution et sur plusieurs espèces. Ceci permet d'appréhender au mieux les réactions des animaux face aux éléments paysagers (Langen, 2009). Le manque d'informations sur les espèces limite en effet les conclusions sur les suivis de populations et sur les comportements individuels (Boulanger, 2010 ; Ruette, 2003). L'importance de données spatiales précises est également soulignée dans le rapport du Sétra (2007). Nous nous concentrons dans la partie suivante sur la problématique de modélisation des données géographiques associées à celles des déplacements.

3.1.2. Qualifier l'apport des données géographiques dans les déplacements

La modélisation de l'espace tel qu'il est perçu et utilisé par les animaux lors de leurs déplacements s'appuie sur la modélisation des connaissances et des données disponibles. La qualification de l'apport des données géographiques dans la compréhension des déplacements recouvrent plusieurs aspects. Dans notre thèse, nous nous sommes intéressée en particulier aux répercussions des spécifications initiales des données sur les choix et les résultats d'analyses, ainsi qu'à l'adéquation des données à nos objectifs spécifiques. Nous détaillons ces deux points.

1) Les spécifications des données géographiques :

Nous cherchons à évaluer l'apport des bases de données géographiques existantes dans la compréhension des choix de déplacement de la faune sauvage. Ces données géographiques constituent a priori des éléments d'explication sur l'utilisation de l'espace par les animaux et des

chemins empruntés pour se diriger vers des lieux attracteurs ou pour s'éloigner de dérangements. Nous nous intéressons aux bases de données topographiques, c'est-à-dire qui décrivent l'espace. Comme la description de l'espace via des données n'est pas neutre et qu'elle entraîne des choix de modélisation et de contenu, nous utilisons des bases dont les spécifications de saisies sont connues. Cela permet d'évaluer les résultats des traitements effectués à partir des données géographiques et sur des données de phénomènes spatialisés. Les bases utilisées dans notre approche sont en effet produites par plusieurs acteurs et correspondent à diverses sources et spécifications.
Nous nous intéressons en particulier aux bases de données géographiques produites par l'IGN. Ces bases de données contiennent des informations destinées à cartographier le territoire. Les données contenues sont une sélection d'éléments du paysage classés selon leur nature, tel que le bâti, le réseau routier, la végétation, le relief. La géométrie des objets est définie et des informations attributaires sont disponibles. Certaines de ces informations, mais pas toutes, sont retenues pour représenter les objets. La visualisation des données peut être paramétrée en fonction de valeurs d'attributs afin de souligner un aspect du paysage. Par exemple lors de simulations d'inondations et de leur représentation cartographique, la forme du relief est une information essentielle aux analyses. La gestion des risques prend en compte les types de bâtiments pouvant être liés à des activités et à la présence de personnes sensibles. La Figure I.41 montre le rôle du choix de la base de données dans la production d'illustrations différentes d'un même secteur. Les différentes informations géométriques et attributaires peuvent alors être intéressantes lors d'analyses de phénomènes précis. Dans le cadre de l'étude des déplacements de la faune sauvage, la problématique sur les données de l'IGN est de déterminer la pertinence des informations et de définir leur modélisation adaptée. Dans le chapitre II, nous présentons les bases de données géographiques exploitées lors du travail de recherche.

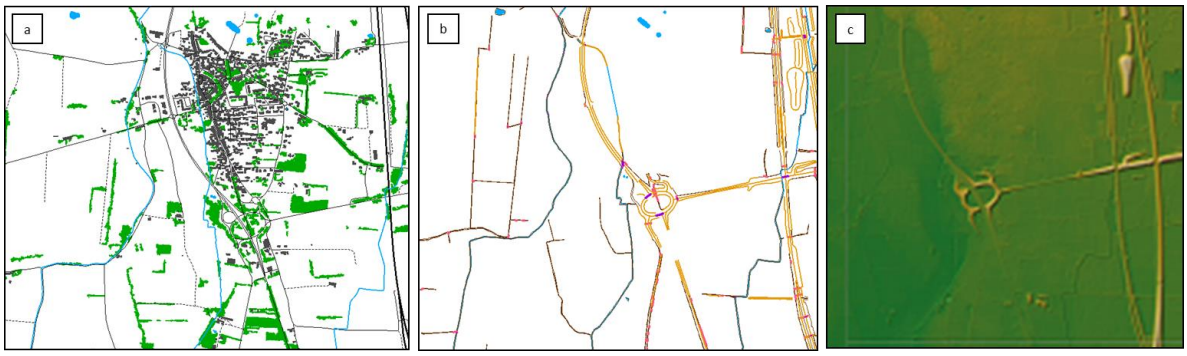


Figure I.41. Visualisation de données géographiques issues de différentes bases sur une même zone. a) Le Référentiel à Grande Échelle (RGE®), b) le Plan Rhône avec des éléments du paysage pertinents pour la prévention aux risques d'inondation comme les talus et les digues, c) un modèle numérique de terrain (MNT) à résolution métrique.

2) L'adéquation entre les analyses des déplacements et les données existantes :

Dans le cas de l'étude des déplacements de la faune, la collecte de localisations d'animaux est nécessaire. De même que les données géographiques, ces localisations répondent à des spécifications impliquant une vision partielle de la réalité. La précision et la complétude des données influencent les résultats d'analyses, en amont de tout choix dans ces analyses. La difficulté est d'identifier ce qu'il est possible d'étudier, et de formuler des hypothèses et des conclusions à partir des données disponibles et de leurs spécifications. Nous cherchons à qualifier l'adéquation entre les informations sur les déplacements et celles sur l'espace. Dans un premier temps, nous sommes amenée à identifier les possibilités d'analyses sur les données disponibles en fonction de leurs spécifications. Nous cherchons ensuite à préciser la cohérence

entre les données disponibles et les connaissances scientifiques sur l'influence de l'espace sur les déplacements.
L'enjeu de la pertinence des données géographiques existantes se pose d'une manière générale dans les études de phénomènes spatialisés. Dans le cas des déplacements de la faune sauvage, les connaissances sont de plus partielles. Nous ne connaissons pas précisément ni l'emprise ni les motivations des déplacements. Notre compréhension s'appuie sur des observations de terrain et sur des analyses postérieures à ces observations. L'abstraction des phénomènes et du contexte environnemental est nécessaire à la modélisation. La représentation et l'incomplétude des descriptions sont à considérer dans la détermination de l'influence du paysage sur les déplacements d'animaux.

La problématique de la thèse s'étend sur plusieurs domaines disciplinaires et se révèle ouverte sur des applications variées. Notre contexte d'application principal demeure toutefois l'aménagement du territoire. La compréhension et la modélisation des relations entre déplacements et aménagement du territoire peuvent consister une aide à la décision. Ce choix de domaine d'application est motivé par des besoins sociétaux exprimés. Il s'appuie sur une description en l'état des lieux concernés, de leur historique, de leur occupation.

3.2. La modélisation des connaissances et des données sur les relations entre espace et espèces : le contexte de l'aménagement du territoire

La problématique sur la caractérisation de l'influence de l'espace sur les déplacements et sur sa modélisation concerne aussi les problématiques autour de la production et l'utilisation des données géographiques et de déplacements. Ces données formalisent des connaissances et ces connaissances sont essentielles notamment dans la planification de projets de modifications de l'espace. Cependant il est différent d'identifier les relations entre déplacement et paysage, et d'évaluer les conséquences de changements paysagers sur les déplacements. L'analyse des relations utilise directement des observations alors que l'évaluation des effets des aménagements se positionne en aval et s'appuie sur des hypothèses formulées à partir des analyses. L'espace support de phénomènes est décrit par les informations contenues dans les bases de données géographiques. La recherche d'explication des déplacements dans le paysage repose sur les données de description de l'espace et sur les localisations connues d'animaux. Concernant les connaissances requises sur les relations entre espace et déplacements, deux aspects suscitent la réflexion :

- la formulation d'hypothèses vérifiées à partir d'observations de terrain et de résultats d'analyses sur des cas particuliers ;
- la représentation des connaissances pour des utilisations ultérieures : modélisation et cartographie.

Ces points sont développés ci-dessous.

3.2.1. Des cas d'étude particuliers pour contribuer à des connaissances générales

Les connaissances sur les comportements spatiaux de la faune sont issues d'observations sur le terrain, impliquant alors :

- une emprise géographique définie ;
- un nombre limité d'animaux observés ;
- une technique de suivi ou une combinaison de techniques qui conditionne la durée de collecte des données de déplacements et des spécifications d'enregistrement ;

- une connaissance du terrain, préalable aux observations et aux interprétations.

La définition d'un site d'étude est soumise à celle de sa superficie et de ses frontières. Le contexte spatial est à prendre en compte à l'intérieur et par comparaison avec les alentours. Les animaux suivis sont en nombre inférieur à la population réelle. Seul un échantillon d'individus est observé ou équipé de matériel de suivi. Les échantillons ne sont pas obligatoirement représentatifs. Ils peuvent ne pas représenter proportionnellement la répartition des caractéristiques d'une population, par sexe, par classe d'âge, par état de santé. Certains suivis peuvent par ailleurs être orientées sur le suivi de certains individus, comme les juvéniles, ce qui permet d'étudier de manière plus exhaustive cette classe d'âge.

L'adéquation entre protocoles de suivi et objectifs d'étude est importante. Pour le suivi des déplacements qui sont des actions continues, la pertinence de la fréquence temporelle des relevés de localisations dépend du type d'analyses souhaitées. L'analyse des migrations sur de grandes distances pour identifier les lieux d'arrêt et les chemins de déplacements peut exploiter des fréquences relativement grandes, quotidiennes ou hebdomadaires par exemple. Par contre, si l'objectif est de connaître les interactions entre paysage et déplacements à des échelles spatio-temporelles plus fines, ou de caractériser la forme des trajectoires journalières, les fréquences devront être plus élevées. Les techniques de suivi décrites précédemment sont choisies en fonction des contraintes des spécifications requises pour les études.

Nous souhaitons évaluer des conséquences positives ou négatives sur la faune de modifications de l'espace. L'étude de la faune est complexe car les comportements demeurent individuels et en partie aléatoires. Les réactions face aux obstacles sont variables entre individus d'une même espèce et ce, d'autant plus si les caractéristiques des espaces sont différentes. Les analyses statistiques permettent d'estimer la variabilité individuelle dans un échantillon tout en prenant compte de la taille de l'échantillon, mais mal les causes de déplacements. Les conclusions apportées sont toujours reliées au contexte. Un intérêt est de confronter les résultats des différentes études à partir de facteurs communs, comme lors des suivis d'une même espèce sur plusieurs sites (Náhlik *et al.*, 2009), au cours du temps (Pellerin *et al.*, 2010), ou de plusieurs espèces sur un même site (Schmidt *et al.*, 2009). Dans nos recherches, nous avons étudié plusieurs cas d'étude car nous avons cherché à rendre compte de la variabilité entre les espèces, entre les sites géographiques et entre les conditions d'exploitation des données répondant à des spécifications et à des précisions différentes. Les cas d'étude concernent trois espèces – le renard, le chevreuil et le cerf – ainsi que des types de milieux différents – périurbain, forestier, agricole. Les données sur la faune suivie, les espèces correspondantes et les sites d'étude sont détaillées dans le chapitre II. Nous y détaillons également l'approche de recherche. Notre démarche consiste à s'intéresser à quelques cas d'étude afin de se placer dans une vision comparative entre les espèces et entre les territoires. La comparaison se situe surtout au niveau des individus dans un même protocole de suivi et entre les cas d'étude. Nous nous concentrons sur les espèces et les types de milieux suivants :

- le renard dans trois zones urbaines et périurbaines ;
- le chevreuil sur deux sites, un de type agricole et boisé, et l'autre forestier ;
- le cerf sur le site en milieu forestier commun au suivi des chevreuils.

Par ailleurs, les données de localisations de faune sont peu nombreuses et font l'objet de collaborations avec les organismes en charge des suivis. Nous nous sommes concentrée sur des espèces de tailles variables mais dont le mode de déplacement reste relativement similaire. Nous nous sommes limitée aux mammifères terrestres et nous n'avons donc intégré ni les oiseaux, les animaux marins ou encore les insectes.

Les modèles et les outils d'aide à l'aménagement s'appuient généralement sur des exemples. L'intérêt est de prendre en compte la diversité des comportements et des déplacements pour ensuite améliorer leur prise en compte en aménagement du territoire. L'enjeu est que ces modèles soient modulables, c'est-à-dire qu'ils puissent s'adapter aux particularités des espaces géographiques, et de prendre en compte leurs modifications. Ils doivent faire le lien entre généralisation des connaissances et spécialisation sur des applications.

3.2.2. La représentation des connaissances et leur utilisation dans les projets d'aménagement

Les données et les résultats d'analyses font l'objet de choix d'organisation et de représentation visuelle. La formalisation des connaissances permet leurs réutilisations futures. Les connaissances peuvent par exemple être organisées sous forme de corpus ou d'ontologie et représentées ensuite par ou superposées à des données géographiques. La cartographie des données est notamment toujours accompagnée de choix : sélection des données, échelle de représentation, symbolisation. Dans la prise en compte des déplacements de la faune sauvage en aménagement du territoire, la visualisation des données et des connaissances est une mise en forme intéressante. Elle permet de rendre compte de certaines caractéristiques propres à la zone concernée, davantage que des informations sous forme de texte. La Figure I.42 illustre une visualisation conjointe de plusieurs sources de données : images, données sur les routes et les bâtiments et toponymes. La première représentation est effectuée en 2D et la seconde en 3D.

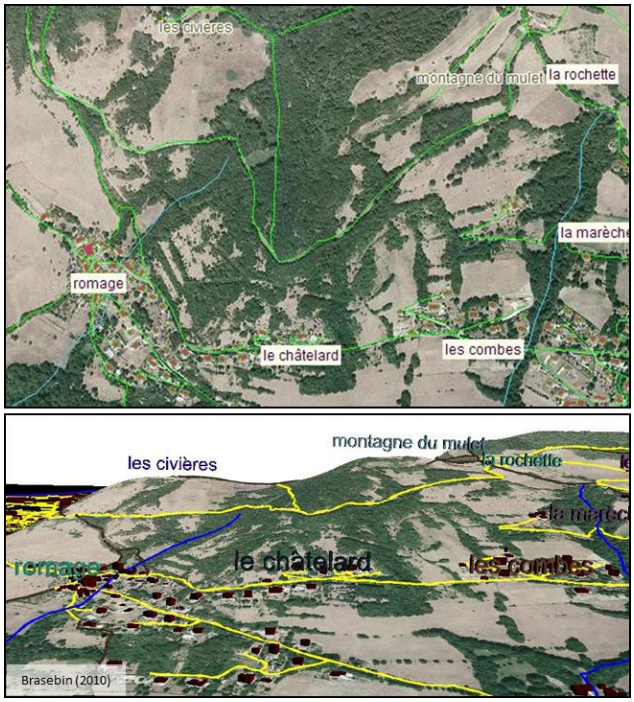


Figure I.42. Photographie aérienne et données de la BD TOPO® du Référentiel à Grande Échelle d'un site en Isère. Représentations en 2D et 3D dans la plateforme GeOxygene 3D (Brasebin, 2010).

Outre la question du choix des bases de données, cet exemple illustre l'intérêt de combiner les bases en une image plus complexe et réaliste. La forme du terrain, les barrières potentielles ou les lieux favorables à la présence et aux déplacements des animaux sont mis en valeur en lien avec l'occupation du sol. L'espace ainsi modélisé et représenté par des données numériques présente également l'avantage de pouvoir être modifié numériquement. Cette représentation offre une visualisation de changements simulés du paysage qui prend en compte les trois axes

spatiaux : deux axes en planimétrie et les hauteurs des éléments du paysage. Cela permet de passer d'une représentation de la réalité à des représentations des projets d'aménagement.

3.3. Objectifs de la thèse et hypothèses de recherche

En partant de l'état de l'art existant et en se positionnant par rapport à notre problématique, nous avons défini nos objectifs quant aux résultats attendus, puis les hypothèses de recherche.

3.3.1. Les objectifs d'analyses et de simulations des déplacements et de l'espace

L'objectif de la thèse est d'étudier les effets de l'espace sur les déplacements de faune et de voir en quoi les aménagements facilitent ou freinent les déplacements. La question est de savoir s'il est possible de détecter le rôle du paysage dans les déplacements des animaux à partir des bases de données géographiques produites. Nous travaillons sur les déplacements : nous cherchons à savoir par où les individus passent et quels sont les lieux qui importent. Nous souhaitons modéliser les déplacements ainsi que l'espace dans lequel sont les animaux et la manière dont ils l'appréhendent selon les espèces. En prenant en compte les données existantes sur la description de l'espace et sur les observations de déplacements de la faune, notre objectif est d'apporter des éléments de réponse aux questions suivantes.

- Quelles sont les analyses possibles des relations entre déplacements et espace géographique à partir des données géographiques existantes et des données sur la faune ? Une précision accrue de ces données est-elle nécessaire ?
  En particulier, nous nous intéressons aux données géographiques produites par l'IGN : quel est leur apport pour comprendre les déplacements de la faune et planifier des corridors dans l'aménagement du territoire ?
- Quelles sont les informations contenues dans les bases de données géographiques à exploiter pour caractériser les déplacements : lieux de passages, obstacles, lieux de motivations aux déplacements ?
- Dans quelle mesure est-il possible de définir les conséquences d'aménagements et plus généralement de modifications du paysage sur les déplacements de certaines espèces ?

Le positionnement par rapport aux recherches et aux travaux existants concerne en particulier la prise en compte de l'espace dans les études sur les déplacements de faune. Le but n'est pas d'améliorer les connaissances sur le comportement des espèces mais de proposer une modélisation des déplacements en lien avec les éléments du paysage. De même, il s'agit de prendre en compte la diversité des déplacements entre les espèces et les espaces géographiques, non de manière exhaustive par espèce mais pour identifier les aspects communs dans les analyses. L'enjeu est de pouvoir représenter de façon efficace l'espace en fonction des espèces étudiées. La lecture de l'espace diffère selon les espèces animales. À plus forte raison, elle diffère de celle des hommes. Les espèces animales ont des comportements propres répondant à des besoins et à des capacités particulières. Les éléments du paysage ne jouent donc pas le même rôle selon les espèces. Certains éléments changent de fonctionnalité ainsi que d'importance. Par exemple, la végétation représente une ressource alimentaire pour certaines espèces animales alors que pour d'autres elle tient principalement de lieu de vie et de zone de déplacement. Plus précisément les enjeux peuvent se décliner comme suit.

- L'identification des lieux importants lors des déplacements :

A priori, ces lieux sont ceux concernant directement le déplacement : lieux de passage ou obstacles ainsi que les lieux de motivation des déplacements (espaces de vie des animaux). Il s'agit de déterminer par où circulent les individus et quelles sont les causes paysagères de leur choix de déplacement.

D'un point de vue des données géographiques, mais également des données sur les déplacements, il s'agit de déterminer si l'identification des éléments du paysage influents est possible et à quel niveau d'exhaustivité.

- L'analyse de phénomènes spatio-temporels :

  La géomatique est la discipline permettant de proposer des méthodes de saisie, de représentation et d'analyse de l'information géographique. Un enjeu est de définir les analyses possibles à partir des données disponibles. La prise en compte des spécifications des données détermine le type d'analyses effectuées.

  La quantité et la qualité des données disponibles posent des problèmes statistiques de représentativité. Les études de cas peuvent être considérées comme des échantillons correspondant à un contexte : nombre d'animaux suivis limités, prise en compte de quelques espèces, sites géographiques en emprise et en nombre restreints, conditions des études de suivis. Les connaissances issues des analyses d'observations doivent être modélisées pour être prises en compte dans des évaluations.
- La prise en compte des déplacements de la faune sauvage lors de projets d'aménagement du territoire :

  L'enjeu est d'évaluer les conséquences de modifications du paysage sur les déplacements et à plus long terme sur la présence et la répartition des espèces. La difficulté est d'assimiler des connaissances générales ou contextualisées pour estimer des situations futures. Prévoir des conséquences d'aménagements à partir de cas particuliers suppose d'extraire les connaissances utilisables et transposables. Cette exigence concerne à la fois les conséquences d'aménagements d'infrastructures ainsi que les mesures en faveur des espèces.
- La définition de modèles de données :

  La modélisation des données permet de représenter les phénomènes et d'organiser les connaissances. Elle inclut la formulation et la hiérarchisation des concepts intervenants dans l'influence de l'espace sur les déplacements. La modélisation de données représente une conceptualisation des faits qui facilite la manipulation des connaissances et leur utilisation.

Dans l'état de l'art, nous avons vu que diverses recherches contribuent à améliorer les connaissances sur le comportement animal et sur la gestion de la faune sur des territoires largement occupé par l'homme. Ces précédents travaux vont nous permettre de proposer une méthodologie adaptée à l'étude de l'influence du paysage sur les déplacements des animaux. Ils vont contribuer à l'interprétation des résultats. Les observations et les théories sur les mécanismes du comportement animal enrichissent les modélisations de la perception et des interactions entre un individu et son environnement. Notre approche pour caractériser et modéliser l'espace utilisé et perçu par les animaux lors de leurs déplacements s'appuie sur les connaissances formulées dans l'état de l'art et sur nos analyses de données. Ces deux sources de connaissances concernent des comportements généraux des espèces et des comportements individuels. Leur prise en compte nous apparaît comme essentielle afin de bien prendre en compte les relations entre faune et éléments du paysage.

3.3.2. Énoncé des hypothèses

Nos objectifs ont été guidés par certaines hypothèses scientifiques dont nous souhaitons qualifier la validité. Nous énonçons nos hypothèses de travail.

- Les bases de données géographiques contiennent des informations intéressantes pour la compréhension des déplacements de la faune. Le niveau de détail des bases de données géographiques doit néanmoins être adapté aux données disponibles sur les déplacements. Il doit également être adapté selon les espèces animales et selon leurs comportements.
- Nous utilisons des données géographiques à grande échelle spatiale qui peuvent potentiellement être intéressantes pour améliorer la compréhension des déplacements de la faune.
- Des influences de l'espace peuvent être détectées à partir des bases de données existantes sur les déplacements des animaux. Ces influences sont cependant à replacer dans le contexte des études et restent soumises aux comportements propres des individus. Elles doivent aussi être relativisées lorsque des informations utiles sur l'environnement ne sont pas disponibles.

Les spécifications sont différentes selon les bases de données. La Figure I.43 correspond à la cartographie de trois bases de données d'occupation du sol. Elles sont chacune dédiée à des objectifs particuliers. La première – CORINE LAND Cover – est une base de données européenne d'occupation du sol à moyenne échelle. La seconde, le Référentiel Grande Échelle (RGE®), est une base de données topographique qui décrit certains éléments du paysage comme la forme du terrain et les réseaux de transport. Elle est entre autres utilisée pour suivre l'évolution du territoire, pour représenter un site et pour l'édition de cartes. Enfin, la Carte Forestière est une base de données de description des essences forestières. Selon les espèces animales, les lieux influents varient. Les différents types d'informations contenus dans les bases de données créées à des fins particulières peuvent se révéler plus ou moins pertinentes.

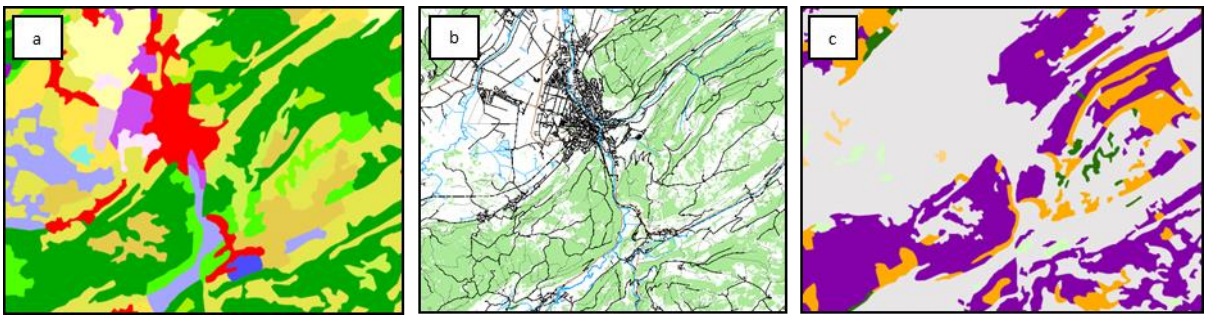


Figure I.43. Trois sources de production de données sur le site d'étude de Pontarlier (Doubs) a) la base CORINE LAND Cover, b) le Référentiel à Grande Échelle produit par l'IGN, c) les types d'essences boisées par l'IFN.

Les caractéristiques des données géographiques qui sont intéressantes sont différentes selon les analyses des déplacements et selon les espèces et les types d'espace. Nous abordons plusieurs de ses caractéristiques : la précision planimétrique, la précision et la modélisation de la composante altimétrique des éléments, l'exhaustivité des bases par rapport au monde réel, la richesse attributaire, la précision sémantique, le renseignement sur les mises à jour. La Figure I.44 montre deux modélisations possibles de zones forestières. Dans ce cas, les précisions géométriques et attributaires varient. Cela illustre les différences de modélisation des données géographiques et ce que ces différences impliquent en termes de connaissances sur la description du paysage. Pour un animal appartenant à une espèce en particulier, nous souhaitons déterminer quelles sont les informations à conserver dans la modélisation de l'espace utilisé et perçu.

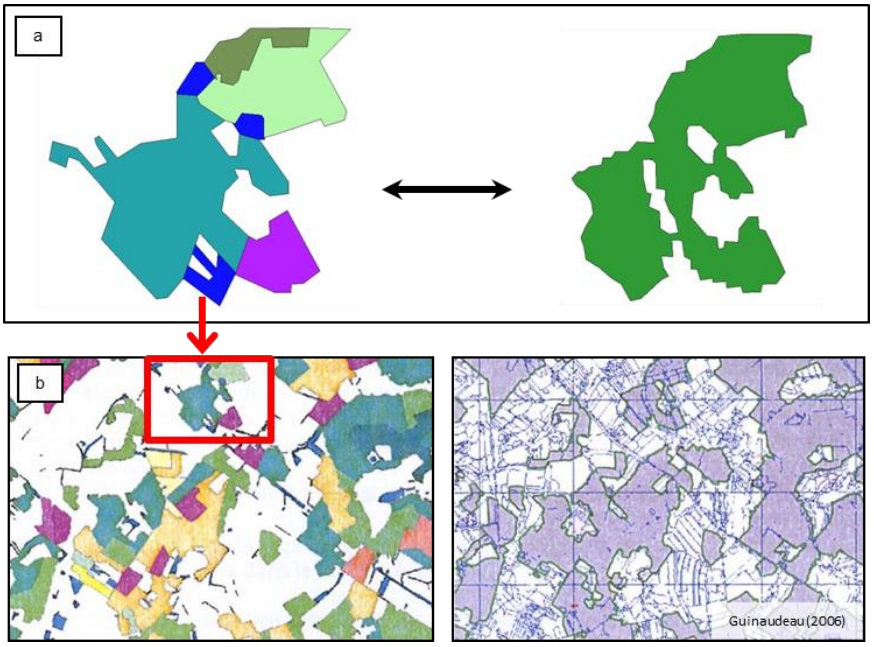


Figure I.44. Différence entre deux bases de données géographiques sur le plan de la précision géométrique et de la précision attributaire. La précision géométrique dépend des critères de saisie sur les zones de forêt. La précision attributaire concerne les essences forestières majoritaires par surfaces identifiées. a) Schéma d'illustration, b) limites des surfaces dans deux bases de données différentes : cartographie forestière par l'IFN et table de végétation de l'IGN. D'après Guinaudeau (2006).

Nous posons l'hypothèse que les bases de données géographiques, dans notre approche en particulier le RGE®, la Carte Forestière et la base CORINE LAND Cover, contiennent des informations pertinentes pour comprendre les déplacements. Ces informations sont différentes selon les espèces animales concernées et selon le type de déplacement étudié – déplacements quotidiens, migrations annuelles. Nous cherchons à préciser si les conclusions concernant l'influence du paysage sur les déplacements sont possibles à partir des données disponibles. Dans le chapitre suivant, nous allons détailler notre approche et les étapes méthodologiques. Nous nous appuyons sur plusieurs cas d'étude relatifs à trois espèces animales évoluant dans différents milieux.

RÉSUMÉ DE LA PROBLÉMATIQUE ET DU POSITIONNEMENT DE LA THÈSE

Le rôle des animaux dans la société est multiple et important. La société a conscience de l'importance de gérer les territoires en prenant en compte la faune sauvage. La compréhension du comportement des espèces animales reste cependant partielle, ce que les suivis scientifiques ont pour but de préciser au-delà des aspects utilitaires de la faune. Leurs déplacements rendent, entre autres, difficiles à suivre les individus et les populations. Pourtant ces déplacements les caractérisent. Le sujet de la thèse porte sur la modélisation des données géographiques dans le cadre des études de déplacements de la faune sauvage. C'est un sujet pluridisciplinaire que nous abordons sous l'angle de la géographie et de la géomatique : la problématique est de qualifier l'influence des éléments du paysage sur les déplacements des animaux selon les espèces. Il s'agit de déterminer d'une part quels sont les lieux et les éléments importants et d'autre part de déterminer l'apport des données géographiques dans cette détermination. Notre état de l'art concerne les thèmes de la mobilité, les analyses de trajectoires ainsi qu'une partie importante en écologie sur le comportement spatial des animaux et sur les relations entre le paysage et son utilisation par les espèces. La formulation des connaissances issues de cet état de l'art peut enrichir notre proposition de modélisation de l'espace perçu par les individus lors de leurs déplacements. L'application s'effectue en aménagement du territoire qui doit prendre en compte les conséquences des modifications du paysage sur les espèces.

CHAPITRE II
–
PRÉSENTATION DES CAS D'ÉTUDE ET DE L'APPROCHE

INTRODUCTION

La thèse porte sur la modélisation de l'espace géographique afin de mieux comprendre l'influence de l'espace sur les déplacements de la faune sauvage. La problématique de la thèse porte sur la meilleure manière d'utiliser les connaissances disponibles afin de déterminer cette influence et de pouvoir évaluer les conséquences de modifications du paysage sur la mobilité de la faune. La représentation des déplacements s'effectue à partir d'enregistrements de localisations ponctuelles d'animaux. Ces enregistrements géoréférencés sont séparés par des intervalles de temps permettant une approximation plus ou moins fine des trajets réels. Les déplacements sont situés dans un espace géographique, lui-même décrit par des données. Les données géographiques sont utilisées pour décrire l'espace dans lequel évoluent les animaux. Dans notre étude des relations entre les éléments du paysage et les déplacements des animaux, nous sommes amenée à nous intéresser aux données géographiques numériques et géoréférencées. Ces données répondent à des spécifications de saisies quant à leur exhaustivité et à leur précision. Un de nos objectifs est donc de déterminer si les données géographiques permettent d'améliorer la compréhension des déplacements des animaux. La cohérence entre les niveaux de précision des données géographiques et des données sur les déplacements représente un point crucial dans notre approche. En fonction des spécifications des données en jeu, nous cherchons à qualifier la pertinence des analyses. Par ailleurs, les déplacements sont dépendants des espèces animales. L'espace est perçu et exploité différemment selon les espèces, au-delà des capacités et des préférences individuelles. Plusieurs applications en aménagement du territoire utilisent des connaissances sur les relations entre espace géographique et déplacements. Les modifications du paysage peuvent avoir des effets importants sur la mobilité de la faune sauvage, et par extension sur sa dynamique. L'apparition ou la disparition d'éléments du paysage ont des conséquences sur les lieux de vie des différentes espèces animales. Les conséquences sur les déplacements peuvent être négatives lorsque l'apparition d'obstacles ou de perturbations freinent la circulation des individus et la mobilité au sein d'une population. Les aménagements pour préserver les milieux naturels et les continuités écologiques peuvent au contraire favoriser les déplacements des espèces animales. L'enjeu de la thèse est de permettre une représentation des déplacements dans l'espace géographique. L'évaluation des répercussions des changements du paysage sur les déplacements a pour but d'en limiter les effets négatifs et de proposer des mesures de compensation.

L'approche de recherche proposée est exposée dans la première partie de ce chapitre. Il s'agit de la démarche générale élaborée dans le but de répondre aux objectifs fixés. Elle vise à tester

les hypothèses énoncées dans le chapitre I. Cette démarche s'appuie sur des études existantes de déplacements d'animaux. Les cas d'étude sont décrits dans la seconde partie du chapitre. Ils portent sur des suivis d'individus correspondant à plusieurs espèces et à différents sites géographiques. Les données et les étapes méthodologiques sont ensuite détaillées dans la troisième partie du chapitre II.

1) L'APPROCHE GÉNÉRALE PROPOSÉE

L'approche générale de recherche consiste à analyser des déplacements de faune observés sur le terrain en relation avec les connaissances sur l'environnement spatial. Nous cherchons à caractériser le rôle des éléments du paysage en fonction des espèces et en fonction du contexte des déplacements. Cette caractérisation de l'espace perçu par les animaux s'appuie sur la formalisation des connaissances sur les déplacements. Elle est dépendante des informations contenues dans les bases de données géographiques et des spécifications des observations sur les déplacements.

1.1. La démarche globale

La démarche générale consiste dans un premier temps à analyser des déplacements d'animaux, puis à définir et à implémenter un modèle de simulation de trajectoires. La ligne méthodologique de la thèse s'attache à l'analyse de suivis de déplacements individuels d'animaux dans leur contexte d'étude particulier. Nous souhaitons déterminer les relations entre les éléments du paysage et les déplacements. Nous cherchons à réunir, à sélectionner et à organiser les connaissances pertinentes pour l'étude des conséquences d'aménagements sur les déplacements. Les principales étapes de l'approche sont énoncées ci-dessous.

a) La prise en compte des connaissances de la littérature sur les relations entre la configuration paysagère et les déplacements de la faune

Cette littérature s'appuie sur des suivis de la faune dans des sites d'étude de types différents. Les études décrites ont souvent pour but de qualifier l'impact des activités humaines et des aménagements. Les connaissances sur les déplacements peuvent être décrites à partir d'observations directes et à partir d'enregistrements des positions des animaux par télémétrie. L'environnement spatial fait également l'objet d'un travail de description des éléments du paysage a priori déterminants.

b) La détermination des cas d'étude sur les déplacements

Le choix des cas d'étude se rapporte aux espèces animales ainsi qu'aux sites géographiques. Nous avons cherché à représenter des espèces terrestres de différentes tailles, vivant dans des milieux plus ou moins anthropisés. Le niveau de détail dans la connaissance des déplacements entre également en jeu. Les cas d'étude qui nous intéressent correspondent à une description géoréférencée des déplacements. Les suivis ne sont pas effectués dans le cadre de la thèse. Les données de déplacements sont issues de travaux antérieurs et menés dans d'autres cadres d'études et de recherches. L'utilisation de données existantes sur les déplacements d'animaux est passée par des collaborations avec des spécialistes en écologie. Les sites d'étude doivent être couverts par des données de description de l'espace à grande échelle. Les données du référentiel à grande échelle (RGE®) – dont BD TOPO® et BD ORTHO® – concernent la totalité du territoire français. La base de données CORINE Land Cover à moyenne échelle spatiale couvre plusieurs pays européens. Toutes ces données sont disponibles en format numérique sur l'ensemble du territoire français dans lequel se situent tous nos sites d'étude. Elles offrent une description du paysage correspondant à des spécifications connues. D'autres sources de données géographiques existent et nous les utilisons en fonction des besoins particuliers de chaque cas d'étude (par exemple, la carte des peuplements forestiers de l'IGN).

c) L'analyse des déplacements correspondant aux cas d'étude définis, et de leurs relations avec les éléments du paysage

Dans nos cas d'étude, les déplacements individuels sont connus à partir de localisations ponctuelles. La description de l'espace est saisie sous forme de bases de données. Les données de localisations et les données géographiques sont numériques et lisibles par des SIG et par des bibliothèques informatiques de traitements et d'analyses. Dans un premier temps, nous déterminons la liste des analyses à mener en correspondance avec la problématique formulée. Le traitement des données de localisations nécessite des choix de modélisation des objets d'étude comme l'interpolation pour travailler sur les déplacements continus et la prise en compte du temps dans la caractérisation des rythmes de déplacements. La considération des éléments du paysage est dépendante des spécifications de saisie. Les prétraitements sur les données géographiques disponibles représentent donc une partie des analyses. Les résultats sont ensuite interprétés en s'appuyant sur les connaissances du terrain et sur les connaissances des experts en écologie animale. Ces experts sont les chercheurs nous ayant donné accès à des données de suivis d'animaux. Les avis sont complétés par les connaissances de la littérature.

d) La formalisation des connaissances et des résultats d'analyses sur les déplacements et l'espace

La formalisation des connaissances s'effectue par une modélisation des objets d'étude ainsi que par celle des concepts associés. La définition d'un modèle de données a pour but d'organiser les connaissances sur les relations entre paysage et déplacements. Ces connaissances concernent principalement la caractérisation des éléments du paysage appréhendés par les animaux et qui influencent leurs déplacements de manière favorable, neutre ou défavorable. Leur formalisation doit pouvoir aider à l'évaluation des effets de modifications du paysage sur les déplacements. Elle s'appuie sur les spécifications des données disponibles.

e) La définition d'un modèle de simulation de déplacements

Le modèle de données sert de cadre à la définition d'un modèle de simulation des déplacements d'animaux. Ce modèle a pour but de générer des trajets effectués selon des comportements animaux et des contraintes spatiales. Le modèle de simulation des déplacements intègre les préférences spatiales, les rythmes de déplacements et la caractérisation de l'espace perçu. Les paramètres de simulation pour la création de trajectoires portent entre autres, sur la précision spatiale et temporelle de l'objet trajectoire créé et la prise en compte de la part d'aléatoire dans les déplacements. Pour tester le modèle de simulation, un protocole de test est défini. Les effets des valeurs des paramètres sur les trajectoires simulées sont analysés. La comparaison entre déplacements observés et simulés intègre le calcul d'indicateurs ainsi que l'avis d'experts écologues pour qualifier la cohérence des déplacements obtenus. Le respect de la cohérence des déplacements construits est important afin de pouvoir par la suite évaluer les effets des modifications du paysage.

f) L'évaluation des effets des aménagements du territoire sur des déplacements simulés

Les projets d'aménagements modifient le paysage par l'ajout ou la suppression d'éléments naturels ou artificiels, et ce sont ces évolutions de la configuration paysagère que nous souhaitons représenter. Les effets d'aménagements sur le territoire peuvent être traduits par une modification des données géographiques dans les bases numériques. La construction d'une infrastructure peut être ajoutée comme entité supplémentaire. La suppression d'un objet numérique représentant un élément du paysage peut aussi être effectuée. Les modifications dans les bases de données géographiques représentent les modifications du paysage suite à des aménagements. Le lancement de simulations sur l'espace modifié, c'est-à-dire à partir de données géographiques modifiées, permet de visualiser les éventuelles conséquences de ces changements sur les déplacements. La comparaison des déplacements simulés sur deux espaces

différents – l'espace actuel et l'espace modifié – permet d'étudier les impacts des aménagements.

La méthodologie générale est résumée en Figure II.1. Elle s'appuie sur des suivis de déplacements de la faune puis sur une formalisation des concepts et des connaissances relatives aux relations entre déplacements et éléments du paysage. Les suivis représentent des cas particuliers car ils se situent sur des espaces géographiques uniques avec des contextes paysagers et sociétaux propres. Comme souligné dans l'état de l'art sur les suivis des déplacements, ces suivis ne concernent qu'un nombre limité d'individus et sélectionnent quelques espèces parmi celles présentes dans les écosystèmes. L'analyse des relations de l'espace entre les déplacements et les éléments du paysage s'effectue sur des échantillons, faute de mieux. Le modèle de données mis en place pour la formalisation et l'organisation des concepts et des relations entre les concepts a pour vocation d'être modulable selon les espèces et les types d'espace.

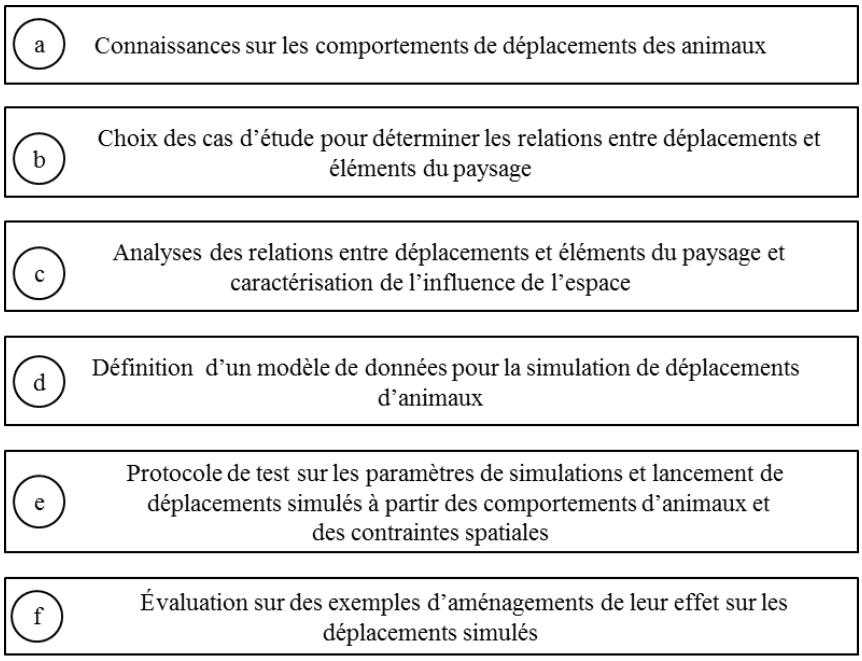


Figure II.1. Description de la méthodologie générale. La chronologie des étapes est indicative car certaines tâches ont été effectuées de manière synchrone.

Afin d'apporter des éléments de réponse aux questions sur l'apport des données géographiques dans la détermination des relations entre espace et déplacements, nous avons associé deux méthodes complémentaires. La première concerne l'analyse de données. Il s'agit d'analyser des données de déplacements et des données géographiques conjointement sur des cas d'étude existants. La seconde consiste à simuler des phénomènes à partir de données numériques. Cette simulation de déplacements ainsi que des modifications possibles du territoire exploite les résultats de l'analyse des données. Elle explore également les possibilités d'exploitation des données géographiques existantes dans l'évaluation des politiques d'aménagement. Le lien entre la partie analyse de données et la partie simulation de déplacements s'opère par une exploitation commune des connaissances sur le comportement animal. Les résultats d'analyses complètent également ces connaissances dans le contexte des suivis particuliers. Ces résultats consistent en des hypothèses sur l'influence du paysage sur les déplacements. La Figure II.2 résume les entrées et sorties des analyses et des simulations ainsi que leur complémentarité.

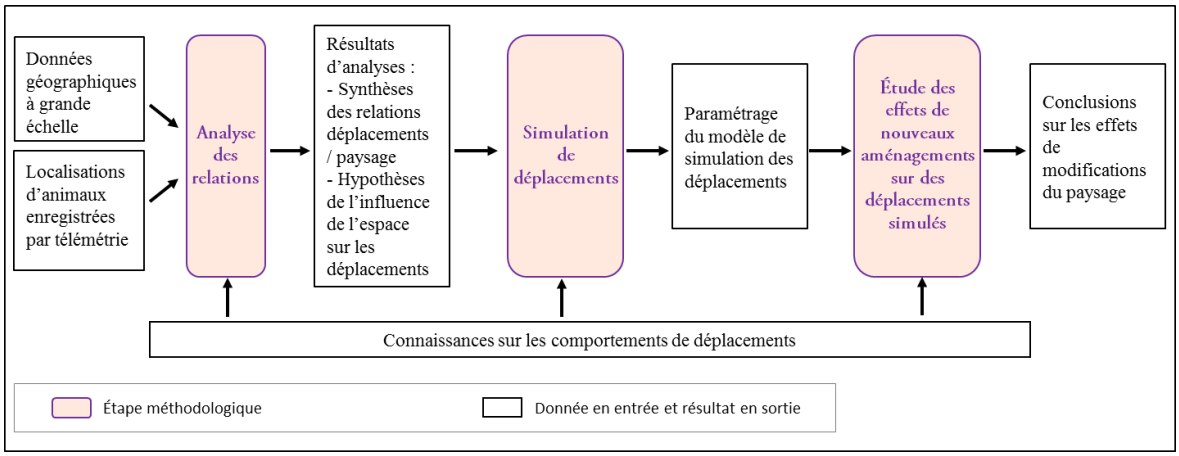


Figure II.2. Analyse de données et simulation de déplacements, s'appuyant sur l'exploitation des données et des connaissances sur le comportement spatial de la faune.

Les deux méthodes, analyse et simulation, explorent la prise en compte des données géographiques à grande échelle pour la compréhension des déplacements de la faune et pour la considération de ces déplacements en vue de projets d'aménagement du territoire. Par ailleurs la démarche intègre des connaissances d'écologues, et des connaissances sur les spécifications des données de déplacements et sur l'interprétation des résultats d'analyses et de simulation. Nous détaillons ces deux parties de l'approche dans les parties suivantes.

1.2. L'analyse des déplacements

Dans l'état de l'art, nous avons vu que de nombreux travaux sur les analyses des déplacements d'animaux exploitent des données sur les déplacements ainsi que des données sur l'environnement des trajectoires. Pour étudier les relations entre déplacements et paysage, nous avons donc besoin de données géoréférencées sur les déplacements ainsi que sur la description du paysage. Nous avons adopté une démarche à partir de cas d'étude concernant plusieurs espèces et différents types d'espace. Le choix des cas d'étude s'inscrit dans une approche par comparaison des comportements des animaux selon les espèces et en particulier des caractéristiques des déplacements. À propos des cas d'étude, les caractéristiques sont détaillées dans la partie II-2 de ce chapitre. Les espèces, les sites ainsi que les protocoles de suivi y sont présentés. Afin de placer les analyses dans leur contexte, nous précisons dès à présent que le choix des cas d'étude s'est porté sur des mammifères de moyenne et de grande taille : renard, chevreuil et cerf. Les sites concernés par les échantillons des individus suivis couvrent des latitudes éloignées, tout en restant en France. Les milieux sont différents, ils se répartissent le long d'un gradient d'anthropisation, d'un milieu urbain à un milieu plus naturel et protégé. L'approche est une analyse fine des relations entre des déplacements individuels et s'appuie sur une comparaison entre espèces. Elle apporte des connaissances sur les déplacements au niveau des individus, plutôt qu'au niveau des espèces au vu du faible nombre d'individus présents dans les échantillons. Les données de déplacements se présentent sous forme de suites de coordonnées des localisations des animaux qui sont aussi renseignées par la date, les propriétés du signal et d'autres propriétés individuelles et environnementales. Ces localisations récoltées par télémétrie offrent une connaissance dont la précision dépend de la technique employée pour suivre les trajets des animaux.
Pour identifier les relations entre déplacements et paysage, les analyses proposées se concentrent sur les relations entre les données numériques de localisations des animaux et les

bases de données géographiques. Ces données, en entrée des analyses, nécessitent des prétraitements qui impliquent des choix de sélection des informations potentiellement intéressantes. Pour les données de déplacements, certains enregistrements peuvent être supprimés car les indications sur la précision des coordonnées spatiales les rendent peu fiables. Il peut par ailleurs se révéler intéressant d'agréger certaines localisations, notamment lorsque leur nombre est particulièrement grand. Ces prétraitements ne font pas directement partie des analyses des relations entre déplacements et paysage. Le mode de traitement choisi se répercute cependant sur les résultats des analyses. La lecture des données géographiques est également soumise à des choix de représentation. La prise en compte des données existantes dans les bases peut différer selon l'objectif et le type d'analyse. La Figure II.3 compare deux représentations d'une même zone à partir d'une même base de données. Des sélections d'éléments ont été réalisées entre la version obtenue suite à une lecture brute des données et la version cartographique. Les valeurs des variables sémiologiques ont été définies à partir de la nature des données, de leur importance, de leur implantation géométrique. Dans le but d'une meilleure lisibilité, des traitements de généralisation de l'information géographique ont également été menés. À partir de la même information, il est donc possible d'avoir des représentations différentes de l'espace.

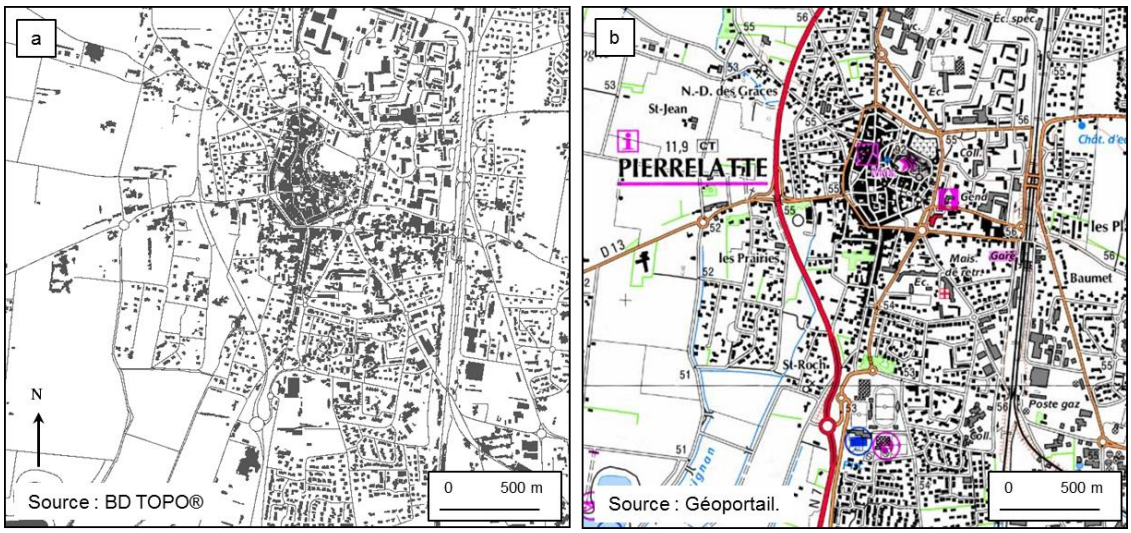


Figure II.3. Une zone représentée de deux manières différentes à partir d'une même source de données géographiques : a) les données brutes sans symbolisation particulière b) la carte construite à partir de prétraitements et de choix sémiologiques. L'emprise des routes est par exemple différente entre la représentation cartographique et la réalité mise à l'échelle.

De même que dans les analyses de données, la cartographie des données nécessite d'identifier quels sont les prétraitements pertinents à appliquer aux données brutes issues des bases. Ces traitements peuvent consister en des extractions d'objets. Ils peuvent également consister en des modifications des objets : fusion ou division, modification de forme, translation. Dans les analyses du paysage, la caractérisation de la répartition des types d'occupation du sol tient une place importante. Cette caractérisation peut par exemple s'attacher à l'étude de la continuité et de la proximité des zones arborées. Les contraintes de saisie et les spécifications peuvent couper cette continuité dans les bases de données alors qu'elle existe dans le monde réel. C'est le cas lorsque deux objets contigus de zones arborées se rapportent à une même entité observée, par exemple à une même forêt. Selon les implantations géométriques, l'emprise des objets mise à l'échelle cartographique peut être sous-évaluée ou bien surévaluée par rapport à la réalité. Par exemple, les routes peuvent être modélisées par une géométrie linéaire dans les bases de données. Cette géométrie peut être représentée avec une largeur plus importante que sa

correspondance dans le monde réel afin d'améliorer la visibilité de l'objet. Les choix sémiologiques engendrent des décalages entre l'emprise référencée sur une représentation cartographique et l'emprise dans le monde réel.

Les différences entre données géographiques et monde réel sont contenues dans les spécifications des bases et dans la définition des choix de représentation cartographique. Lors des analyses, ces biais peuvent être en partie pris en compte lors des prétraitements de l'information et lors de l'interprétation des résultats.
Les analyses des relations entre les données de déplacements et les données géographiques concernent plusieurs points.

- Une caractérisation des déplacements d'après les informations disponibles :
  L'enregistrement contient les coordonnées spatiales, le temps, des indications sur la qualité du signal. La caractérisation concerne à la fois l'emprise spatiale des déplacements, leur rythme et les conditions d'enregistrement des localisations. Les données de déplacements sont dans nos études une suite de localisations connues. L'information est donc discontinue. La gestion de cette information en tant qu'information de déplacement qui est une action continue, requiert des choix méthodologiques.
- Une caractérisation du paysage à l'aide des données géographiques :
  Les données concernent les éléments du paysage qui sont en partie décrits à grande échelle dans le RGE®. Il ne s'agit pas d'une description exhaustive au niveau sémantique ni au niveau géométrique. D'autres sources de données peuvent apporter des compléments dans la description de l'espace.
- Les relations géométriques entre les données géographiques et les données de déplacements :
  La situation des données de déplacements par rapport aux données géographiques est étudiée. Nous souhaitons caractériser des relations spatiales en calculant des indicateurs géométriques comme des distances ou des relations d'inclusion. Il s'agit ensuite de caractériser ces relations par une identification des préférences spatiales ou des comportements d'évitement des éléments du paysage par les animaux. En fonction des données disponibles sur un individu et du nombre d'individus d'une espèce, l'interprétation s'effectue sur des comportements individuels ou relatifs à l'espèce.
- La prise en compte des informations attributaires :
  Ce point est lié au précédent. Les informations attributaires sont attachées aux géométries des objets dans les bases de données. Elles se présentent sous forme textuelle. Plusieurs attributs peuvent être associés à un objet. Chaque attribut possède un type (nombre, texte, date) et un intervalle de valeurs ou des valeurs prédéfinies. Un exemple sur la fonction des bâtiments et la nature des routes est montré en Figure II.4. Ces informations enrichissent les résultats et les interprétations sur les relations géométriques entre données de déplacements et données géographiques. Selon le contenu des bases de données, nous nous attachons à intégrer dans les analyses la distinction entre des valeurs d'attributs dans les données géographiques.

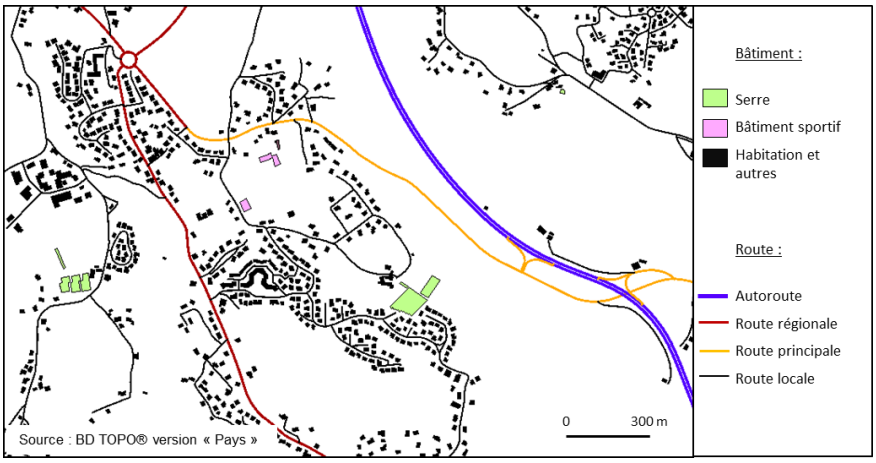


Figure II.4. Symbolisation des données topographiques du bâti et des axes routiers en fonction des informations attributaires sur la fonction des bâtiments et le classement des routes.

Les connaissances bibliographiques et les connaissances d'écologues sur les déplacements représentent une ressource essentielle dans l'interprétation des résultats d'analyses. Ces connaissances sont nécessaires pour une première lecture des données de déplacements. Elles interviennent pour expliquer les relations spatiales calculées du point de vue du comportement de déplacement selon les cas d'étude. Des hypothèses de recherche ont été formulées dans la partie I-3.3 se rapportant à l'utilité des données géographiques dans la compréhension des déplacements de la faune. Nous avons posé comme hypothèse de départ que les informations contenues dans les bases de données géographiques sont intéressantes pour expliquer certains comportements. Cette hypothèse est accompagnée de celle énonçant que la pertinence des informations est dépendante de l'espèce et du contexte environnemental des déplacements. Nous cherchons par les analyses à déterminer si les données géographiques existantes suffisent à identifier des préférences paysagères pour les animaux lors des déplacements, ou au contraire des indications d'évitement. Nous nous intéressons ainsi à la présence et à la répartition des différents éléments du paysage par rapport aux itinéraires de déplacements.

1.3. La simulation des déplacements en fonction des espèces et des éléments du paysage

Pour évaluer l'apport des données géographiques dans la compréhension des déplacements d'animaux, nous proposons une seconde méthode, qui est complémentaire des analyses de données. Il s'agit de lancer des simulations de déplacements à partir de comportements connus d'animaux et de leurs relations vis-à-vis des éléments du paysage. Les analyses de données permettent d'explorer les relations entre données géographiques et données sur les déplacements. La définition de plusieurs cas d'étude offre par ailleurs la possibilité de comparer des déplacements d'espèces différentes, idéalement sur un même espace et sur plusieurs espaces. La simulation produit des trajectoires théoriques dont la construction dépend de la définition du processus de simulation et des caractéristiques des données de description de l'espace dans lequel évoluent les animaux.
Le premier intérêt de la simulation est de pouvoir qualifier la justesse de la prise en compte de l'environnement déduite des analyses de données. Une comparaison peut s'effectuer entre les déplacements observés et des déplacements construits par simulation. Cette comparaison sert à déterminer quelles modifications et quels enrichissements dans le modèle de simulation sont intéressants à apporter afin de mieux correspondre aux déplacements des animaux. La comparaison s'attache en particulier aux éléments de l'espace utilisés lors des déplacements

simulés. Le paramétrage du modèle de simulation et la détermination de valeurs cohérentes des paramètres représentent une finalité dans la comparaison entre observations et simulations. Les modifications de l'espace peuvent être générées à partir des données géographiques. La description de l'espace varie en fonction de la sélection des thèmes et des valeurs attributaires. La perception de l'espace lors des déplacements simulés est paramétrable. L'espace perçu est constitué des éléments du paysage que les animaux rencontrent lors de leurs trajets. Les animaux perçoivent ces éléments selon leur influence sur leur présence. La perception d'une route peut par exemple être celle d'un obstacle au déplacement pour atteindre l'autre côté des voies. Elle peut aussi être celle d'une zone facilitant les déplacements car correspondant à un milieu ouvert et à un relief plat, voire à la présence de ressources alimentaires comme par exemple des essences végétales intéressantes. La perception de l'espace correspond à l'utilisation que les animaux s'en font et aux ressources qu'ils y trouvent. La Figure II.5 décrit des aspects contribuant à la perception de l'espace par les animaux. Il peut s'agir de la définition du domaine vital correspondant à l'espace parcouru quotidiennement et connu par les individus, de zones précises de ressources, ou encore de structures linéaires de végétation permettent la connexion entre des zones d'intérêt.

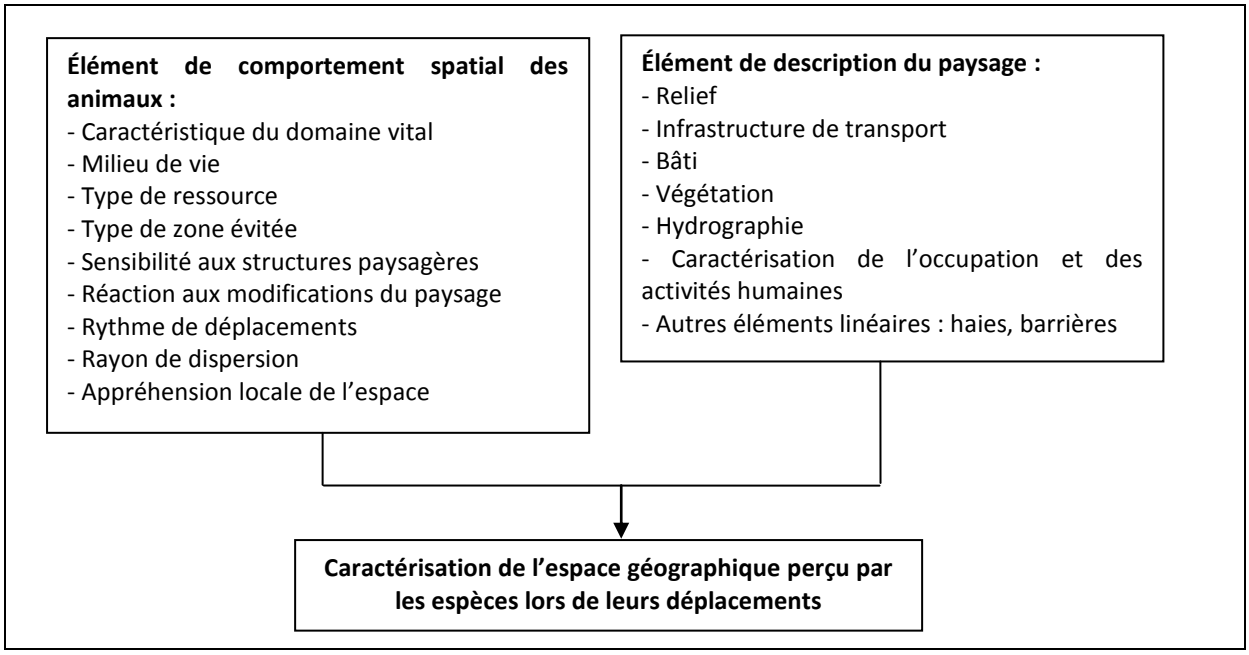


Figure II.5. Utilisation de l'espace géographique du point de vue des déplacements par espèces : liste d'éléments du comportement des animaux avec une inscription spatiale et liste d'éléments de description du paysage, pour une caractérisation de l'espace selon les espèces animales.

Le second point d'intérêt porte sur les applications potentielles des simulations de déplacements dans un espace numérique. Des déplacements peuvent être construits par le modèle de simulation défini dans différents espaces et pour plusieurs espèces. Les espaces peuvent représenter la réalité ou être modifiés, c'est-à-dire qu'ils correspondent à une représentation de projets d'aménagement. Les applications de la simulation de déplacements concernent en particulier les tâches suivantes.

- Préciser les hypothèses sur les causes spatiales des déplacements :
  La simulation de trajectoires en fonction des espèces peut permettre de tester des hypothèses sur les causes spatiales des déplacements. Cet aspect utilise des hypothèses formulées suite aux analyses de données et pouvant être élargies à d'autres cas d'étude. Par exemple, en dehors des sites d'étude, il peut être intéressant de tester si les

déplacements simulés restent cohérents par rapport aux éléments du paysage ou si le modèle de simulation doit être modifié ou enrichi.

- Identifier des zones favorables aux déplacements en s'appuyant sur les comportements modélisés, par espèce et par individu :
  La simulation peut être vue comme une approche bottom-up servant à dégager des tendances générales à partir d'une définition de contraintes locales. La construction s'effectue à partir de la formulation de contraintes et de comportements concernant un animal et ses déplacements. La traduction dans les trajectoires simulées peut aider à relire l'espace du point de vue des déplacements. Par exemple, en prenant en compte les paramètres du modèle de simulation, il est intéressant d'étudier les zones parcourues par les déplacements simulés. Des zones peuvent être parcourues plus fréquemment que d'autres. La sélection de ces zones et leur caractérisation sont intéressantes pour identifier des zones de corridors favorables aux déplacements. La création possible d'un grand nombre de trajectoires par simulation permet l'identification de zones privilégiées pour les déplacements. Ces zones sont des couloirs hypothétiques dont il faut par la suite vérifier l'utilisation effective par la faune. Elles peuvent être déterminées selon les espèces, puis recoupées pour plusieurs espèces, comme dans les méthodes d'identification cartographique de la Trame Verte et Bleue (TVB).
- Tester des modifications du paysage et leurs conséquences sur les déplacements :
  L'évaluation des effets d'aménagements se réalise sur les déplacements simulés. Même si la prise en compte de l'ensemble des effets des modifications n'est pas exhaustive dans un modèle de simulation, les résultats donnent des indications sur les conséquences de ces modifications sur les déplacements. Les effets à plus long terme sur les espèces sont à estimer à un niveau plus global que le seul point de vue des déplacements. Déplacement et présence des espèces sont liés, et il est intéressant de voir si les effets de modifications du paysage sur les déplacements peuvent ensuite se répercuter sur la présence des animaux.

La mise en place d'un modèle de simulation suppose la prise en compte des connaissances sur :
- la forme du déplacement ;
- la caractérisation de l'espace et plus largement de l'environnement des déplacements ;
- le comportement des individus.

Le modèle de données établi, une stratégie de simulation pour construire des trajectoires doit être définie. La stratégie de simulation prend en compte les concepts modélisés et les processus permettant de créer une trajectoire en fonction de contraintes. Les contraintes concernent dans notre problématique, le comportement d'un animal et en particulier son comportement de déplacement face à des éléments du paysage. Nous proposons de modéliser le processus de simulation de déplacements de faune par une construction de trajectoire par une approche orientée agent. Un agent est ici un animal, et l'environnement est l'espace géographique dans lequel il évolue. Le comportement d'un agent, notamment vis-à-vis de son environnement, détermine la construction des trajectoires. L'agent se déplace en respectant au mieux ses contraintes intrinsèques et les contraintes de l'environnement. Les déplacements sont alors construits à partir de comportements individuels et de relations établies par l'analyse de données entre déplacements et éléments du paysage.

Un aménagement peut être considéré comme une modification de l'espace. Après la validation du modèle, nous définissons des scénarios de tests des effets d'aménagements sur les déplacements. Ces scénarios concernent des projets fictifs d'aménagement. Il peut s'agir de la construction d'une nouvelle route ou d'une autre infrastructure de transport. Il peut également s'agir de la construction d'une nouvelle zone de bâti ou plus largement d'une artificialisation des

sols[1]. Les scénarios de tests d'aménagement peuvent également concerner des installations en faveur de la faune. Dans le cas des déplacements, il peut s'agir de mesures locales avec la construction de passages à faune favorisant la traversée d'un obstacle. Les modifications peuvent aussi se traduire sur la configuration paysagère. La continuité de milieux, objectif des politiques comme la TVB, peut être améliorée par la mise en place de zones de végétation intermédiaires entre deux grandes zones naturelles. Des tests sur les différents scénarios d'aménagement a priori obstacle ou favorable aux déplacements sont lancés espèce par espèce. Chaque espèce correspond en effet à un comportement particulier des agents. Les déplacements avant et après modifications de l'espace sont comparés ainsi que la réponse de plusieurs espèces à une même modification.

[1] Nous reprenons la définition du MEEDE (http://www.developpement-durable.gouv.fr/) sur l'artificialisation des sols. Celle-ci correspond à la perte de l'état naturel d'une surface que ce soit par construction de bâti souvent associée à la présence humaine et à des activités, ou par application d'un revêtement artificiel.

2) PRÉSENTATION DES SITES ET DES ESPÈCES ANIMALES ÉTUDIÉES

Nous définissons dans la partie II-2.1 les cas d'étude et leur mode de réalisation. La sélection de ces cas particuliers est expliquée. Par la suite dans la partie II-2.2, les sites d'étude correspondant aux données de déplacements sont présentés ainsi que les animaux suivis. La partie II-2.3 contient un résumé des études et des connaissances sur les espèces animales étudiées, connaissances susceptibles de nous aider à interpréter les données. Nous avons effectué une revue de la littérature sur les comportements et en particulier les comportements de déplacement. Cet état de l'art vient en complément de celui du chapitre I qui présente des études sur diverses espèces animales et l'intégration des connaissances dans les politiques de conservation.

2.1. Présentation des cas d'étude

Pour répondre aux objectifs de détermination des relations entre déplacements et paysage, nous suivons une démarche s'appuyant sur des données saisies à partir d'observations. La détermination des cas d'étude nécessite que des données sur les déplacements d'animaux aient été récoltées et que des données de description de l'espace existent sur la zone parcourue. Nous désignons par le terme « cas d'étude », l'ensemble espèce suivie et site correspondant. Les suivis correspondent aux données effectivement enregistrées.

2.1.1. Les sources des données et les contextes des cas d'étude

Les données concernant les déplacements d'animaux peuvent être récoltées selon plusieurs méthodes et ainsi répondre à des spécifications différentes, comme décrit au chapitre I. Pour faciliter la réalisation de notre recherche, nous souhaitons utiliser des données qui proviennent d'études existantes. Nous avons besoin de données précises sur les déplacements. La première étape de notre recherche a consisté à identifier les données disponibles. Ce type de données est obtenu à partir de techniques de télémétrie qui intègrent la pose de matériel émetteur ou de GPS sur les animaux. La mise en œuvre de ces suivis requiert des connaissances en écologie ainsi que des connaissances du terrain sur la présence des espèces et sur leurs habitudes dans la zone étudiée. Ceci fait appel à un travail antérieur de repérage, par observations visuelles et si possible par enquêtes auprès des habitants. Les suivis nécessitent un encadrement par une équipe de personnes dédiées à cette tâche, ainsi que des habilitations à capturer puis à relâcher les animaux équipés.

La détermination des cas d'étude s'effectue à partir de nos objectifs : l'analyse de l'influence de l'espace sur les déplacements et la détermination de la pertinence des données géographiques pour étudier ces déplacements. Il est donc intéressant de s'attacher à plusieurs espèces ainsi qu'à des types d'espaces différents. Nous souhaitons prendre en compte des comportements de déplacements divers, qui concordent avec les besoins de chaque espèce et les caractéristiques de leurs déplacements. Les éléments du paysage n'ont pas la même influence selon les espèces. Plusieurs sites d'étude offrent des possibilités de comparaison. Les espèces étant plus ou moins inféodées à un milieu, plusieurs sites correspondant à des milieux différents permettent de prendre en compte des espèces avec des exigences différentes. Par ailleurs, les bases de données géographiques répondent à des spécifications selon des thèmes. Tous les thèmes d'occupations du sol ne sont pas couverts par les bases de données. La différence entre les sites

d'étude tient dans les types d'occupation du sol et dans la disponibilité des données acquises. Au préalable, nous effectuons donc un inventaire des données existantes et disponibles sur les sites, développé dans la partie II-3.2. Idéalement, les cas d'étude concerneraient plusieurs espèces sur un même site géographique et une même espèce sur plusieurs sites. Les sites doivent présenter une certaine hétérogénéité. Les espèces ont des besoins spécifiques. Plusieurs espèces suivies nous semblent donc intéressantes car même pour des espèces relativement proches, les comportements sont différents.

Afin de pouvoir étudier des déplacements, la démarche a consisté à travailler en collaboration avec des écologues. Les cas d'étude de notre recherche sont définis à partir de suivis préexistants. Ils concernent trois espèces : le renard roux (*Vulpes vulpes*[2]), le chevreuil européen (*Capreolus capreolus*) et le cerf élaphe (*Cervus elaphus*). Les sites de suivi sont localisés dans différents départements. Ils sont listés ci-dessous, avec les espèces correspondantes et la source des données de déplacements, ainsi que sur la carte en Figure II.6. Nous travaillons ainsi sur six cas d'étude en distinguant les cerfs des chevreuils sur le site des Vosges.

- En Haute-Savoie (74), sur et à proximité de la commune d'Annemasse. Des renards ont été étudiés par l'Entente de Lutte Interdépartementale contre les Zoonoses (ELIZ).
- Dans le Doubs (25), sur et à proximité de la commune de Pontarlier, l'ELIZ y a également étudié les renards.
- À la périphérie de Nancy, Meurthe-et-Moselle (54). Le suivi concerne aussi des renards. Les données ont été récoltées et analysées lors de la thèse de Robardet (2007) réalisée à l'Anses (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail).
- Dans le Parc Naturel Régional des Vosges du Nord. Le site d'étude est plus exactement la RNCFS (Réserve Naturelle de Chasse et de Faune Sauvage) située dans le département du Bas-Rhin (67). L'Office National de la Chasse et de la Faune Sauvage (ONCFS) y suit entre autres les populations de chevreuils et de cerfs. Ces deux espèces sont incluses dans nos cas d'étude.
- Dans le canton d'Aurignac situé dans le département de Haute-Garonne (31), le cas d'étude s'appuie sur les suivis de chevreuils menés par l'INRA.

[2] Le nom scientifique des espèces correspondent à la classification de Carl Von Linné désignée par (Linnaeus, 1758).

Figure II.6. Carte de situation des sites d'étude et des espèces suivies.

Les données sur les déplacements des espèces proviennent de plusieurs études, toutes effectuées dans le cadre d'établissements publics. Ces établissements sont brièvement présentés ci-dessous ainsi que leur mission dans le contexte des cas d'étude.

Les données de déplacements des renards dans la périphérie de Nancy proviennent des recherches doctorales de Robardet (2007). Cette thèse a été menée dans le Laboratoire de la rage et de la faune sauvage de Nancy de l'Anses, anciennement nommé Laboratoire d'Études et de Recherches sur la Rage et la Pathologie des Animaux Sauvages (voir l'encadré sur les missions de l'Anses et de l'ELIZ). Les suivis ont été menés dans le cadre de recherches et d'actions autour de l'échinococcose alvéolaire chez le renard en milieu urbain et périurbain. Les questionnements de la thèse portaient en particulier sur les effets de l'urbanisation du milieu sur les relations proies-prédateurs, entre les renards et une sélection d'espèces de micromammifères, ainsi que sur l'utilisation de l'espace par les renards. Les zones urbaines représentent en effet des risques de transmission du parasite entre le renard et l'homme à cause de la concentration des habitations. Le renard est par ailleurs une espèce qui a colonisé les milieux urbanisés, soit par une occupation permanente soit par des excursions temporaires pour y chercher des ressources alimentaires.

Les données concernant Annemasse et Pontarlier appartiennent à l'ELIZ. Ces deux villes ont été l'objet de protocoles de suivi entre 2003 et 2005 afin d'étudier l'occupation de l'espace par les renards et la présence du parasite (Raton, 2004). Ces études ont ensuite permis la mise en place d'actions tests de vermifugation[3] des renards sur les deux sites afin d'évaluer l'efficacité d'une telle prévention (voir l'encadré sur les missions de l'Anses et de l'ELIZ).

[3] La vermifugation consiste à administrer un médicament (un vermifuge) pour éliminer les parasites du corps des animaux. La prise d'un médicament s'effectue généralement à intervalles de temps réguliers.

Les missions de l'Anses et de l'ELIZ

Le Laboratoire de la rage et de la faune sauvage de l'Anses existe depuis 1972[4]. Une de ses missions est de maintenir une veille sanitaire chez les animaux sauvages et domestiques. Il développe en parallèle, des thématiques de recherche en biologie sur les agents pathogènes, et en épidémiologie sur l'évolution des maladies de la faune et des risques qu'elles représentent. L'ELIZ est un Établissement Public Interdépartemental[5], autrefois nommé Entente Rage Zoonose ou ERZ. Cet établissement, créé en 1973, a eu pour vocation initiale de stopper la progression de la rage vulpine en France et de réunir les efforts fournis par plusieurs départements dans un plan d'action global (Thévenot, 2003). Il travaille en partenariat avec le laboratoire précédent de l'Anses. Les programmes d'éradication de la rage sur le territoire, notamment à l'aide d'un vaccin par voie orale chez les renards, ont permis à la France d'obtenir en 2001 le statut de pays « indemne de rage » auprès de l'OIE (Organisation Mondiale de la Santé Animale). Ce statut a depuis été maintenu, à l'exception des années 2008-2010, suite à l'observation d'un cas de rage canine déclaré comme autochtone (Debaere *et al.*, 2010). La vigilance contre la maladie est cependant toujours en cours chez les populations de chiens et de renards à cause de l'importation d'animaux de l'étranger. Le virus de la rage, même si la souche est différente de celle des canidés, est aussi présent chez les populations de chiroptères qui sont soumises à une surveillance accrue (Ponçon *et al*., 2010). Le laboratoire de l'Anses et l'ELIZ se penchent également sur d'autres zoonoses, en particulier l'échinococcose alvéolaire touchant les renards. L'échinococcose est une zoonose qui se transmet, par définition, des animaux vers les hommes et inversement. Cette maladie est provoquée par le parasite *Echinococcus multilocularis* qui possède deux types d'hôtes lors de son cycle. Les hôtes intermédiaires sont les petits mammifères dont des espèces de campagnols des genres *Arvicola* (par exemple, le campagnol terrestre) et *Microtus* (par exemple, le campagnol commun). Les hôtes définitifs sont principalement des carnivores, entre autres, chats, chiens, renards. L'homme ne constitue pas un hôte mais il peut être infecté par le parasite qui peut avoir des conséquences létales.

Les données sur les cervidés[6], qui comprennent les chevreuils et les cerfs, ont été fournies par l'ONCFS[7]. L'Office a été créé en 1972. Il a pour mission d'encadrer les activités de chasse et de surveiller le respect des lois sur l'environnement. Il aide à la définition des ORGFH, Orientations régionales de gestion et de conservation de la faune sauvage et de ses habitats, encadrées par les Directions régionales de l'environnement. Il contribue aux Plans de Chasse qui arrêtent les nombres minimal et maximal d'animaux à prélever par espèce de gibier et par département (Charlez, 2008). L'ONCFS conduit également des études sur la faune à travers plusieurs CNERA, Centres nationaux d'Études et de Recherche Appliquée. Les centres sont organisés autour d'un groupe d'espèces. Le centre sur les ongulés[8] sauvages qui regroupent les cervidés et les sangliers, focalise ses activités sur plusieurs thématiques : le suivi et la gestion des populations, les collisions avec les véhicules, la compréhension des dynamiques de population. Les cas

[4] Site Web : [http://www.anses.fr/]
[5] Site Web : [http://www.e-l-i-z.com/]
[6] Les cervidés forment une famille de mammifères incluant les espèces de cerf et de chevreuil ainsi que le daim, l'élan, le renne.
[7] Site Web : [http://www.oncfs.gouv.fr/]
[8] L'appellation « ongulé » regroupe principalement les animaux terrestres se déplaçant sur leurs ongles pouvant avoir la forme de sabots.

d'étude se rapportent à des recherches sur l'équilibre entre ongulés et forêt dans la RNCFS de La Petite Pierre (Saïd dans ONCFS, 2008, p. 34). Les données ont été récoltées entre autres dans l'objectif de préciser l'utilisation des habitats par les chevreuils et les cerfs, en prenant en compte la caractérisation de ces habitats et les ressources disponibles ainsi que les dynamiques des populations (ONCFS, 2008) et les comportements. Par exemple, la comparaison des régimes alimentaires de ces deux espèces sympatriques[9] a été étudiée par Storms *et al.* (2008).

Le CEFS[10], Comportement et Écologie de la Faune Sauvage, est un laboratoire de l'INRA, situé à Toulouse. Les recherches concernent plusieurs espèces d'ongulés sauvages, dans un environnement naturel et dans un enclos. Le laboratoire a mis en place depuis 2003 un suivi annuel des chevreuils équipés de colliers GPS sur le Canton d'Aurignac. Les données enregistrées permettent d'étudier l'utilisation de l'espace par les individus ainsi que leurs rythmes et formes de déplacements (Morellet *et al.*, 2011 ; Coulon *et al.*¸ 2008). La sélection de l'habitat en fonction de variables spatiales est analysée à partir des localisations et d'une description de l'espace. La caractérisation et le rôle de la fragmentation du paysage sur les individus et sur les populations constituent également une thématique de recherche (Hewison *et al.*, 2009). Dans notre recherche, nous nous intéressons en particulier aux chemins empruntés par les chevreuils, et à l'identification d'obstacles et d'éléments favorables aux déplacements.

2.1.2. Sélection des cas d'étude

Les études selon les contextes et les organismes dans lesquels elles se sont déroulées, se réfèrent à des domaines différents de notre problématique. Les données de déplacements et d'occupation de l'espace par les renards ont été collectées dans une perspective de surveillance et de prévention épidémiologique. Les suivis sur les chevreuils et les cerfs ont été menés dans des objectifs plus larges que celui de la connaissance des déplacements. Les données sur les déplacements représentent un apport en termes de localisation géographique et de connaissances des activités des animaux. Ces localisations peuvent ensuite être recoupées avec des variables environnementales et avec des traits phénotypiques[11]. Les coordonnées des localisations connues peuvent être affichées dans le même environnement numérique que les données géographiques. Les espèces et les sites d'étude sont toutefois contraints par les suivis existants, qui ne correspondent pas obligatoirement à une étude exhaustive des espèces sur un même espace ou d'une même espèce dans plusieurs espaces. Nous aurions aimé intégrer davantage de cas d'étude mais il s'avère que les données de traces restent rares et difficiles à acquérir. Les critères d'intérêt pour sélectionner les cas d'étude, espèce et espace, sont développés ci-dessous.

- La cohérence entre données de suivi de déplacements et bases géographiques :

La première étape dans la détermination des cas d'étude a consisté à définir les caractéristiques auxquelles répondent les espèces choisies. L'objectif étant d'étudier les relations entre les données de description de l'espace et les déplacements, cela nous a fait écarter les animaux aquatiques, dont les déplacements ont lieu uniquement dans l'eau. L'hydrographie ne représente qu'un type d'élément du paysage et sa description notamment dans le RGE® ne concerne que son emprise et non ses propriétés physiques. Nous avons choisi d'éliminer les oiseaux et les chiroptères car cela supposait de prendre en compte la dimension verticale des

[9] Se dit d'espèces affines, c'est-à-dire présentant une forte ressemblance, et qui vivent sur des aires géographiques se superposant.

[10] Site Web : [http://www2.toulouse.inra.fr/cefs/]

[11] Le phénotype est l'ensemble des caractères qui sont observables chez un organisme vivant, caractères physiques, génétiques, comportementaux, et qui sont dus soit à l'hérédité soit à l'environnement.

déplacements, indépendamment de l'altitude du terrain. La cohérence entre l'animal et la granularité des bases de données dont celles de l'IGN est un autre critère, car il faut pouvoir détecter les relations entre l'espace et ses déplacements. Les petits animaux se déplaçant sur de courtes distances peuvent ne pas parcourir un espace suffisamment étendu pour être décrit par les bases de données. Le choix a donc été guidé par le type d'animal recherché, c'est-à-dire des mammifères de taille moyenne à grande, particulièrement sensibles aux aménagements comme les infrastructures de transport, puisqu'un de nos objectifs est d'évaluer leurs effets.

- Les techniques de suivis de déplacements :

Le choix des espèces a ensuite été limité par les techniques de suivis des animaux. Nous souhaitions disposer d'enregistrements des localisations, ce qui fait obligatoirement appel à des systèmes de télémétrie. Comme vu dans le chapitre I, le poids du matériel porté par l'animal ne doit pas excéder 5 % de son propre poids. Il reste donc difficile d'étudier les individus dont le poids est inférieur à 5 kg. Cette contrainte restreint en termes d'espèces et de classes d'âge car un jeune individu peut ne pas avoir le poids suffisant par rapport à un adulte. Les suivis de mammifères terrestres s'effectuant principalement par système VHF et par GPS, ils s'accompagnent de la pose d'un collier qui ne doit pas gêner l'animal, notamment en phase de croissance.

- La diversité des espèces et des sites d'étude :

La sélection des sites d'étude est fortement liée aux choix des espèces. Nous avons déjà évoqué l'intérêt de disposer de sites correspondant à des milieux variés. Cette diversité offre la possibilité de manipuler des données décrivant différentes occupations du sol et répondant à des spécifications propres. Les espèces sont plus ou moins inféodées à un type d'habitat, en relation avec les types d'occupation du sol. Les recherches sur certaines espèces peuvent se concentrer sur un type de milieu. Par exemple, les études contemporaines sur le renard en milieu urbain viennent de l'observation relativement récente de sa présence à proximité des villes. Les chevreuils et les cerfs sont attachés à des milieux plus naturels, notamment de type forestier, et s'observent rarement à la périphérie des villes. Par ailleurs, nous nous intéressons aux aménagements réalisés sur le territoire français en lien avec des politiques publiques, comme celles menées par le Ministère en charge de l'environnement et du développement durable.

- La dépendance vis à vis des données disponibles :

Les études de suivis d'animaux par colliers GPS sont peu nombreuses en France. Les systèmes de colliers GPS ont l'avantage de pouvoir enregistrer les localisations à des fréquences temporelles plus élevées que par VHF. Au vu des coûts de matériel et des ressources humaines indispensables, seuls des organismes spécialisés et des associations peuvent généralement conduire des études complètes. Le nombre d'animaux suivis et la durée des études dépendent du contexte des travaux de recherche ou de suivi par les établissements publics. La sélection des cas d'étude a donc étroitement dépendu des données existantes et des collaborations possibles avec les propriétaires des données ainsi qu'avec les écologues qui ont des connaissances sur les espèces. Cette collaboration est indispensable du point de vue de la manipulation des spécifications et des données enregistrées ainsi que de leur interprétation. Certains sites sont décrits dans les bases de données avec un niveau de précision supérieur à celui de la BD TOPO®. Des études pour la prévention d'inondations ont par exemple amené à la création de bases de données enrichies comme pour le Plan Rhône (DREAL Rhône-Alpes, 2010). Cependant l'emprise du site ne correspondait pas avec celle des suivis de faune. Le ciblage des données géographiques peut ne couvrir qu'une partie de l'espace occupé par les animaux. La comparaison des déplacements d'une même espèce sur plusieurs sites a été possible pour les renards et les chevreuils, même si les spécifications des données diffèrent entre les études. Le suivi sur un même site de plusieurs espèces est possible pour le chevreuil et le cerf dans la

RNCFS de La Petite Pierre. Les données de déplacements sur un même site de plusieurs espèces sont rares lorsqu'elles incluent la pose de collier GPS. Outre les études actuelles de l'ONCFS à La Petite Pierre, une étude dans le cadre du programme de recherche « In Situ » est en cours par le CERFE, Centre de recherche et de formation éco-éthologie (Helder & Hubert, 2012). Ce programme a été lancé officiellement en juillet 2012 et se concentre sur plusieurs sites d'étude en région Champagne-Ardenne. Il comprend des études génétiques des populations de plusieurs espèces dont le chevreuil, le renard, le blaireau, le chat forestier.

- Le comportement des espèces et leur rôle :

Le renard, le chevreuil et le cerf n'ont pas les mêmes comportements spatiaux ni les mêmes rythmes de déplacements. Ces espèces n'ont ni la même taille ni les mêmes capacités de déplacement. Les éléments du paysage ne peuvent a priori pas être caractérisés de manière identique d'un point de vue des obstacles et des lieux favorables aux déplacements. Ces espèces ont des besoins alimentaires et des cycles biologiques différents, ce qui motive des déplacements adaptés. Nous pouvons attendre des différences d'autant plus nettes que le renard n'appartient pas à la même famille que les deux espèces de cervidés. Le chevreuil et le cerf sont tous les deux des herbivores. Il est donc intéressant de distinguer la diversité des comportements entre ces deux espèces voisines.

Les trois espèces animales étudiées possèdent l'intérêt d'être représentées dans l'ensemble du territoire français, avec des densités variées. Le renard est présent dans tous les départements même si on ne peut donner d'estimation du nombre d'individus de la population française. Par exemple, Ruette (2003) estime à partir de comptages dans douze sites d'étude une densité entre 0,4 et 3,5 renards par km² en 2000, chiffres non généralisables à l'ensemble du territoire. Le chevreuil est présent dans la plupart des forêts françaises (ONCFS, 2008). Les populations sont estimées à environ 1,6 millions en France en 2007, nombre qui aurait été multiplié au moins par cinq depuis trente ans (ONCFS, 2007). Le cerf occupe environ la moitié des forêts françaises (Pfaff *et al.*, 2008). En 2010, 20 départements recensaient plus de 3000 cerfs, 53 départements moins de 3000, et 13 départements aucun cerf. Le total serait environ 160 000 individus en métropole[12]. Le fait que les espèces aient une répartition spatiale sur l'ensemble du territoire et que leur nombre soit relativement élevé favorise les études de suivis de déplacements. La présence commune des trois espèces augmente leurs interactions avec les hommes et leurs actions sur le territoire, ce qui rend ces espèces sensibles aux projets d'aménagements. De plus, le succès de captures pour la pose de matériel de suivi en est facilité. En effet, même pour des espèces à forte densité, les taux de captures peuvent se révéler très faibles (Lee, 1997). Dans Ruette (2003), le succès de capture varie entre 0 et 4 pour 100 nuits-pièges[13].

Les espèces étudiées n'ont pas de statut de protection au vu de leur nombre. Leur prise en compte est néanmoins importante dans les politiques d'aménagement du territoire ainsi que dans les mesures en faveur de la faune. Le **renard** est une espèce considérée comme généraliste et ubiquiste (Sordello *et al.*, 2012). Il couvre donc de nombreux types de milieux. Ses besoins sont susceptibles de se superposer avec ceux d'autres espèces. Son étude permet également de couvrir une large partie du territoire, en intégrant les milieux urbains et en ne se concentrant pas uniquement sur des milieux plus naturels. Le renard peut par ailleurs être cité comme une espèce clé de voûte. Sa disparition dans la chaîne alimentaire peut provoquer des déséquilibres chez d'autres espèces. Il contribue à la régulation des populations de rongeurs notamment lors

[12] Source : [http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/]

[13] Une nuit-piège est une nuit pendant laquelle des observations ou des collectes sur les animaux et sur leurs traces ont été réalisées. Le nombre de nuits-pièges représente ainsi la durée d'une étude, ce qui est en particulier pertinent pour les espèces actives en période nocturne.

des épisodes de pullulation, par la prédation qu'il exerce en parallèle de celle de carnivores spécialisés comme l'hermine (Thévenot, 2003 ; Note & Poix, 2006). Sage (2008) parle d'espèce sentinelle pour évaluer les taux de transfert d'un rodenticide[14] des espèces de rongeurs vers leurs prédateurs. De même que le renard, le **chevreuil** est présent dans plusieurs milieux : purement forestier, agricole avec zones boisées fragmentées (ou agrosystèmes), montagnard. Son rôle est important au sein de la chaîne trophique en particulier en présence de grands prédateurs dont il constitue une proie. Il participe à la diffusion des végétaux par le transport de graines, jouant ainsi un rôle dans le bon fonctionnement des écosystèmes (Boulanger, 2010). Le **cerf** a pour habitat principal la forêt. Il est donc a priori sensible à la fragmentation des massifs forestiers. L'étude de l'influence du paysage sur ses déplacements peut se révéler intéressante pour d'autres espèces dépendantes des milieux forestiers, pour l'identification des continuités paysagères et des zones de corridors à privilégier. Le cerf est un grand mammifère qui peut être qualifié d'espèce clé de voûte car il joue un rôle sur la répartition des communautés végétales (Kie *et al.*, 2005).

D'un point de vue de l'aménagement du territoire et de la gestion de la faune sauvage, chacune des espèces cristallise des problématiques concernant les interactions entre la faune sauvage et les hommes. Le renard est susceptible d'être classé dans la liste des espèces nuisibles publiée annuellement par département (FNC, 2010). Il est d'ailleurs classé comme tel sur l'ensemble des départements des sites d'étude, le Doubs (25), la Meurthe-et-Moselle (54) et la Haute-Savoie (74)[15], ce qui rend possible son piégeage suite à une autorisation préfectorale. Renard, chevreuil et cerf sont toutes des espèces chassables. Concernant les menaces potentielles que représentent ces espèces, les zoonoses en font partie, comme pour l'échinococcose dont le renard est porteur. Le cerf est par exemple concerné par la tuberculose bovine, qui peut être contagieuse pour les bovins d'élevage (Hars *et al.*, 2006). Le chevreuil est également porteur de plusieurs maladies potentiellement contagieuses à l'homme et aux animaux domestiques (Cacard, 2004 ; Decors *et al.*, 2011). Un autre enjeu est celui des collisions entre grande faune et véhicules. Les chevreuils et les cerfs sont amenés à traverser certaines routes notamment si la fragmentation de leur zone de vie est importante. Le nombre de collisions est estimé actuellement autour de 1600 pour les cerfs et 16 500 pour les chevreuils par an (Vignon & Barbarreau, 2008). Les renards sont également victimes de collisions, avec des dégâts moindres sur les véhicules. Dans l'étude menée en Franche-Comté le long de 500 km de routes nationales et d'autoroutes, le nombre de collisions recensées entre renards et véhicules est d'environ 170 sur les années 2010 et 2011, alors qu'il est de 68 pour les chevreuils (Conruyt-Rogeon & Girardet, 2012). Les renards ont une mauvaise réputation liée à la prédation des élevages de volailles. Il semble pourtant que leurs attaques soient ciblées vers des proies faibles ou malades et que leur fréquence reste relativement limitée (Rivals & Artois, 1996).
Les trois espèces peuvent être considérées comme faisant partie de la « nature ordinaire » mise en avant dans la protection actuelle de l'environnement dont parle Godet (2010). Elles représentent un intérêt par leur comportement de déplacements différent et par leur appréhension de l'espace spécifique. Nous revenons dans la partie II-2.3 sur les trois espèces étudiées, sur leurs caractéristiques et sur les recherches et les suivis qui leur sont consacrés notamment sur l'influence de l'espace sur leurs déplacements.

[14] Les rodenticides sont des produits visant à tuer, principalement par ingestion, les espèces de rongeurs présents dans les cultures (par exemple des anticoagulants).
[15] Les espèces par département sont éditées sur le site : [http://www.oncfs.gouv.fr/Textes-juridiques-relatifs-a-la-chasse-ru291/Arrete-2-aout-2012-tableau-departemental-nuisibles-ar1339]

2.2. Description des sites géographiques et des animaux suivis

Les sites d'étude sont répartis sur l'ensemble du territoire métropolitain. Les animaux suivis se déplacent généralement sur des zones qui ne se superposent pas. Chaque individu peut donc être associé à un site d'étude. Cependant, nous définissons les sites d'étude au sens large. Il s'agit des cinq sites dont l'emprise correspond à celle du contexte géographique des études dont sont issues les données de déplacements : les villes et périphéries de Pontarlier, d'Annemasse et de Nancy, la RNCFS de La Petite Pierre et le nord du canton d'Aurignac. Elles sont nommées par souci de simplification : Pontarlier, Annemasse, Nancy, La Petite Pierre (ou les Vosges) et Aurignac. Nous présentons les sites d'étude en lien avec les animaux suivis. Les surfaces englobant l'ensemble des localisations des animaux suivis sont respectivement : 50 km² (Pontarlier), 80 km² (Annemasse), 70 km² (Nancy), 25 km² (La Petite Pierre), 2500 km² (Aurignac). Nous nous attachons ici à la description de l'espace et de l'occupation humaine. Les animaux suivis sont décrits par leur nombre et leurs caractéristiques. Chaque individu suivi a été nommé, nous reprenons ces mêmes noms lors de leur présentation et lors des analyses. L'ensemble des cartes des sites d'étude se trouvent en Annexe 1.

2.2.1. Ville et périphérie de Pontarlier

La commune de Pontarlier est située à la frontière avec la Suisse. Elle se positionne au nord du Jura. Le centre urbain de Pontarlier est situé sur un plateau autour de 800 mètres d'altitude. Le relief autour de ce petit centre urbain est vallonné, notamment à l'est avec la montagne du Larmont. Des collines sont situées à proximité au nord-est et au sud-ouest, et à 3 km de distance côté nord-ouest, comme illustré en Figure II.7.

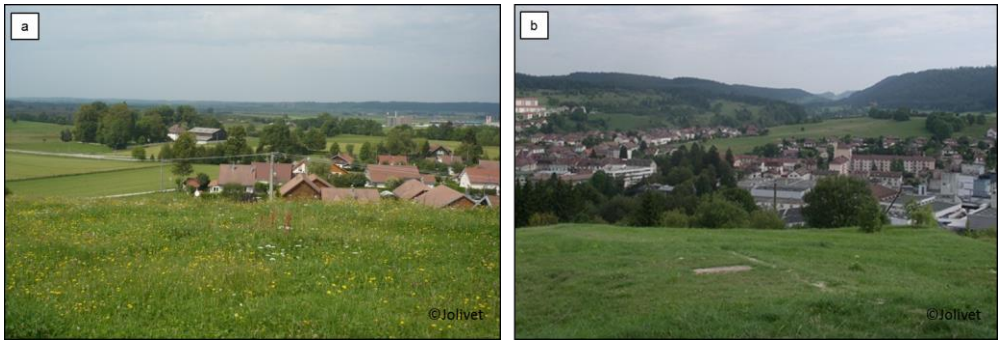


Figure II.7. Le site d'étude de Pontarlier : a) l'ouest de la zone, au premier plan une prairie utilisée par les renards suivis ; en contrebas la zone résidentielle au sud du centre-ville et au loin une zone peu urbanisée b) au sud-est du centre-ville, en contrebas le Doubs, la route nationale et la ligne de chemin de fer, en arrière plan la montagne du Larmont.

Le climat de la zone est de moyenne montagne. Le couvert forestier se superpose aux zones de relief plus élevé citées précédemment. Le centre-ville est traversé par la rivière Doubs du sud vers le nord. Deux autres cours d'eau sont présents : le ruisseau des Lavaux venant de l'est se jette dans le Doubs et le Drugeon longe la ville par l'ouest puis traverse des marais. Les infrastructures de transport routier et ferroviaire sont présentes, cartographiées en Figure II.8. Une route nationale longe le Doubs au sud puis contourne le centre-ville par l'ouest. La ligne de chemin de fer principale est située au sud de la ville. L'étalement urbain reste faible à l'extérieur du centre-ville, en dehors de la zone industrielle et de l'aérodrome situés à l'ouest, et de zones résidentielles relativement peu étendues. Les communes limitrophes sont principalement des

villages. Pontarlier est une sous-préfecture du Doubs peuplée d'environ 20 000 habitants (recensement de 2010 par l'INSEE).

Les renards suivis par l'ELIZ sont au nombre de quatre sur la zone de Pontarlier, trois femelles et un mâle. Leurs positions ont été enregistrées selon les individus entre juillet 2004 et février 2006. Chacun des renards occupe un domaine vital dont l'emprise est estimée à partir des localisations connues et dont nous calculerons la superficie dans le chapitre III. Ces domaines sont principalement situés à la périphérie du centre urbanisé comme illustré en Figure II.8.

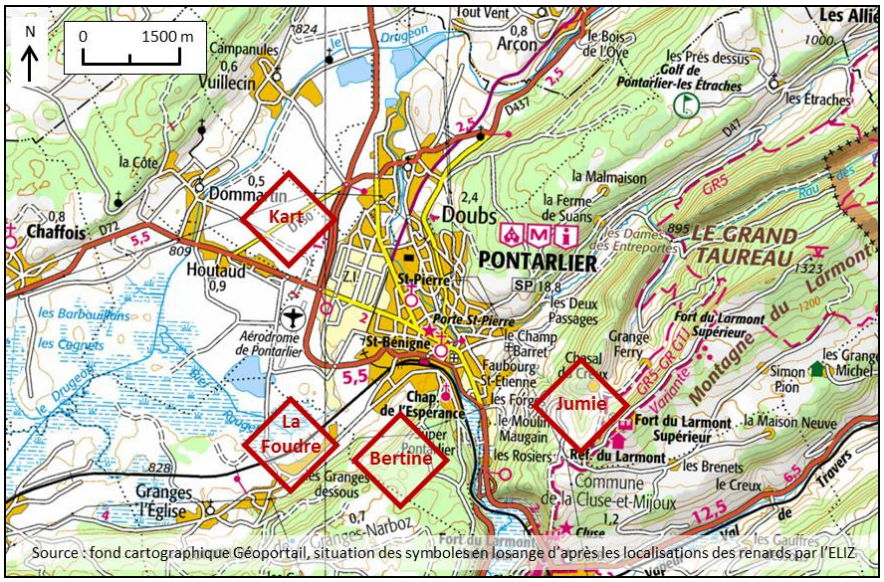


Figure II.8. Carte du site d'étude et centres de l'ensemble des localisations correspondant aux quatre renards suivis par l'ELIZ.

Les précisions sur les captures et sur les suivis se trouvent dans le rapport de Raton (2004). La femelle Bertine est une adulte vivant au sud dans le secteur dit des Ganges dessous. Les deux autres femelles sont des jeunes, nées l'année précédant la capture. La Foudre vit également au sud-ouest du centre-ville, autour de la voie ferrée. Jumie parcourt un espace au sud-est, à l'est du Moulin Maugain. Un seul mâle a été suivi, Kart, vivant à l'ouest du site, à proximité de la zone industrielle.

2.2.2. Ville et périphérie d'Annemasse

Le site d'étude comprend la ville d'Annemasse et ses alentours. Le lac Léman n'est distant que de 5 km vers le nord-ouest, la ville s'inscrit donc dans un relief de plaine dont l'altitude varie entre 400 et 500 m. Les altitudes élevées se retrouvent au sud du site avec la Petite Salève à 900 m, ainsi qu'au nord-ouest avec la montagne des Voirons qui culmine à 1480 m. Le climat est sous influence montagnarde du fait de la situation entre les Alpes et le Jura. En dehors du tissu urbain, la forêt recouvre le sud du site, au niveau de la Petite Salève. Les rivières Arve et Menoge coulent en contrebas, délimitant vers le sud les communes de Gaillard, Annemasse et Vétraz-Montroux. À l'est, les terres sont exploitées en cultures et en prairies, entre l'agglomération et la forêt des Voirons. Concernant les infrastructures de transport, un axe autoroutier longe l'agglomération au sud. En dehors du réseau viaire du centre-ville d'Annemasse, des routes au trafic important sont présentes à l'est, notamment pour relier la route nationale 206 desservant les rives du lac Léman au nord. Trois lignes de chemin de fer traversent l'agglomération à l'ouest et au sud, rejoignant la gare principale située au centre-ville. Les renards suivis par l'ELIZ sur le

site d'étude d'Annemasse ont principalement été localisés en périphérie du centre-ville (carte de la Figure II.9). Les enregistrements sont répartis sur neuf communes, toutes faisant partie de l'agglomération d'Annemasse. Celles-ci forment un tissu urbain continu avec la ville de Genève en Suisse, les plaçant dans une position de communes frontalières. L'agglomération a connu une forte augmentation de la population dans la deuxième moitié du XXème siècle. Elle compte environ 80 000 habitants (chiffre de l'INSEE de 2010). Le centre-ville est à présent majoritairement composé d'habitats collectifs. La périphérie comprend des zones d'activités, principalement au sud-ouest et au nord-est. La frontière située au nord-ouest de l'agglomération traverse des zones fortement urbanisées. Au sud-est par contre, l'urbanisation est moins dense. L'habitat individuel s'étend jusqu'en bordure de prairies et de bois. Le site comprend deux zones protégées : le mont de la Petite Salève et la montagne des Voirons, qui sont classés en ZNIEFF[16] et en site Natura 2000 Directive Habitats.

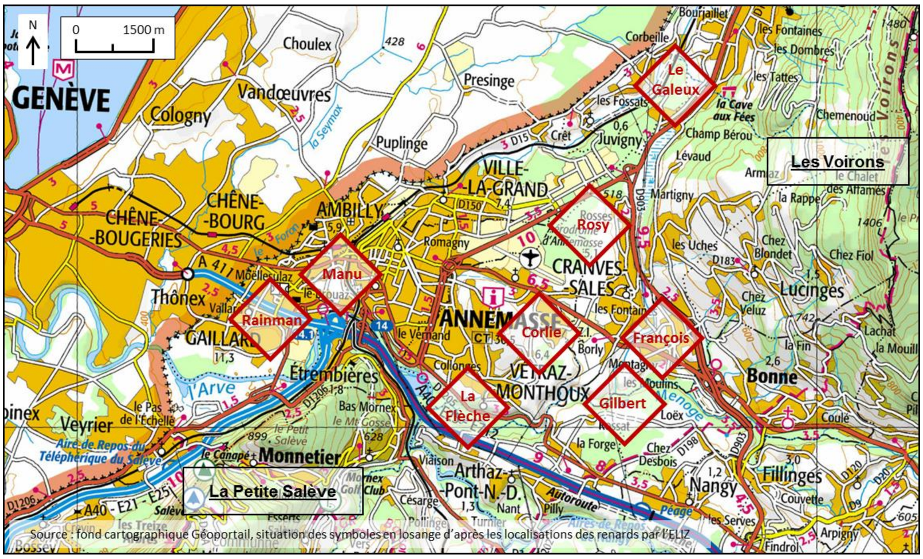


Figure II.9. L'agglomération d'Annemasse et la situation centrale des localisations des 8 renards suivis par télémétrie par l'ELIZ.

Huit renards ont été suivis par télémétrie sur le site dont cinq mâles et trois femelles. Cette étude a été menée entre mai 2003 et novembre 2005. Les renards n'ont pas tous été suivis à la même période. La durée des suivis dépend de la date de capture, 2003, 2004 ou 2005, et de celle de la disparition ou de la mort de l'individu. Les renards ont été nommés comme suit :

- Corlie, femelle, dont les localisations ont été enregistrées au nord de Vétraz-Montroux, à l'est d'Annemasse (voir la Figure II.10.a).
- La Flèche, femelle, a un domaine vital principalement localisé au sud de Vétraz-Montroux, le long de l'Arve et du Menoge (voir la Figure II.10.b).
- François, mâle, s'est déplacé au centre de la commune de Cranve-Sales.
- Gilbert, mâle, a occupé l'espace au sud de cette même commune.
- Rosy, femelle, a été localisée à l'est de l'aérodrome.
- Le galeux, mâle, a évolué aux alentours de Juvigny.
- Manu, mâle, était présent au sud-ouest du centre-ville d'Annemasse dans le quartier du Brouaz, au contact avec la zone d'activités de maraîchers du sud de l'agglomération.
- Rainman (R), mâle, est essentiellement localisé sur la commune de Gaillard, sur les bords de l'Arve.

[16] ZNIEFF : Zones Naturelles d'Intérêt Ecologique Faunistique et Floristique. Ces zones font partie d'un inventaire utilisé dans le cadre de gestion du territoire ; elles ne sont pas opposables.

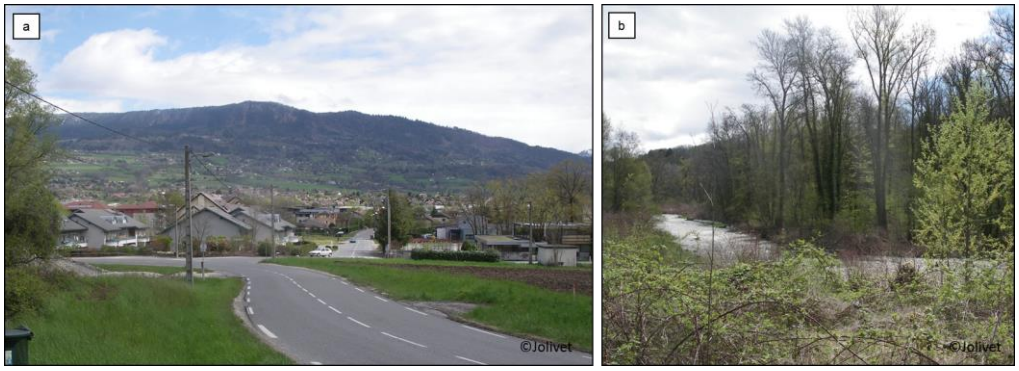


Figure II.10. Photos de la commune de Vétraz- Montroux où sont observées les deux femelles Corlie et La Flèche : a) zone résidentielle traversée par une route départementale b) au sud, les bords de l'Arve inhabités.

Les renards suivis fréquentent la proximité de l'agglomération. Ils exploitent surtout des espaces verts moins densément urbanisés comprenant des cultures, des champs, les bords inhabités de rivière. Comme à Pontarlier, les individus restent en majorité absents du centre-ville.

2.2.3. L'agglomération de Nancy

L'agglomération nancéienne s'est développée sur une plaine traversée par la Meurthe et plus au sud par la Moselle. Le relief est relativement plat sauf au nord-est et sur toute la limite ouest où l'altitude passe de 200 m à plus de 400 m au niveau du Bois de la Grande Fraize. Le climat est de type semi-continental. La forêt domaniale de Haye s'étend sur tout l'ouest de l'agglomération. À l'est, le couvert boisé est plus fragmenté et l'espace est occupé par des cultures agricoles et des prairies. Comme dans la plupart des grandes agglomérations françaises, un contournement routier a été mis en place. Plusieurs tronçons autoroutiers sont présents à l'ouest et au sud du site d'étude (A31 et A33). Le réseau routier est particulièrement dense dans l'agglomération urbaine, entre le réseau viaire et les grandes voies de communication avec l'extérieur. Le transport ferroviaire est assuré par une voie ferrée longeant la Meurthe et passant au cœur de l'agglomération, et par une autre voie venant du sud-ouest.
Nancy est le siège de la préfecture de Meurthe-et-Moselle et fait partie de la Communauté urbaine du Grand Nancy qui comprend au total vingt communes et plus de 260 000 habitants (chiffre de l'INSEE de 2009). Les suivis des renards dans le cadre de la thèse de Robardet (2007) se sont déroulés sur l'ensemble de cette zone. Les localisations enregistrées sont concentrées autour de Nancy, dans des communes disposant d'un tissu urbain contigu avec le centre-ville de Nancy. La plupart des renards suivis sont en fait localisés au sud de l'agglomération, qui présente un habitat de type plutôt résidentiel. Le bâti est varié, associant des immeubles hauts, de petits habitats collectifs et des maisons individuelles. Plusieurs zones industrielles se situent au sud et à l'est de l'agglomération. Plusieurs parcs urbains et espaces verts sont également présents (voir les photographies en Figure II.11).

Figure II.11. Les renards suivis exploitent un espace périurbain différent : a) photo d'un parc urbain à Vandœuvre-lès-Nancy dans lequel se déplace Martine, entouré par des maisons d'habitations, des immeubles et une zone commerciale b) photo sur le domaine de vie de Frantz, prairie longeant un bois, en arrière-plan au nord la commune Saulxures-lès-Nancy.

Les quatre renards correspondant à l'échantillon de données utilisé lors de la thèse se répartissent en trois mâles et une femelle. Ils sont d'âge adulte. Les espaces exploités par chacun recouvrent tous une zone périurbaine. Trois d'entre eux sont a priori plus ancrés dans le milieu urbain au sud de la ville : les déplacements de Chaussette (numéroté 1), de Julien (3) et de Martine (4) se situent respectivement dans les communes de Jarville-la-Malgrange, de Villers-lès-Nancy et de Vandœuvre-lès-Nancy. Les localisations de Frantz (2) ont été enregistrées à l'est du site, à Saulxures-lès-Nancy et Art-sur-Meurthe. Elles se situent à la périphérie de l'agglomération urbaine, sur un espace couvert par des champs et par des bois. Le type d'espace est donc différent entre les trois renards évoluant en milieu urbanisé dense, et un renard vivant à proximité de l'agglomération. La cartographie du site d'étude (Figure II.12) illustre cette différence.

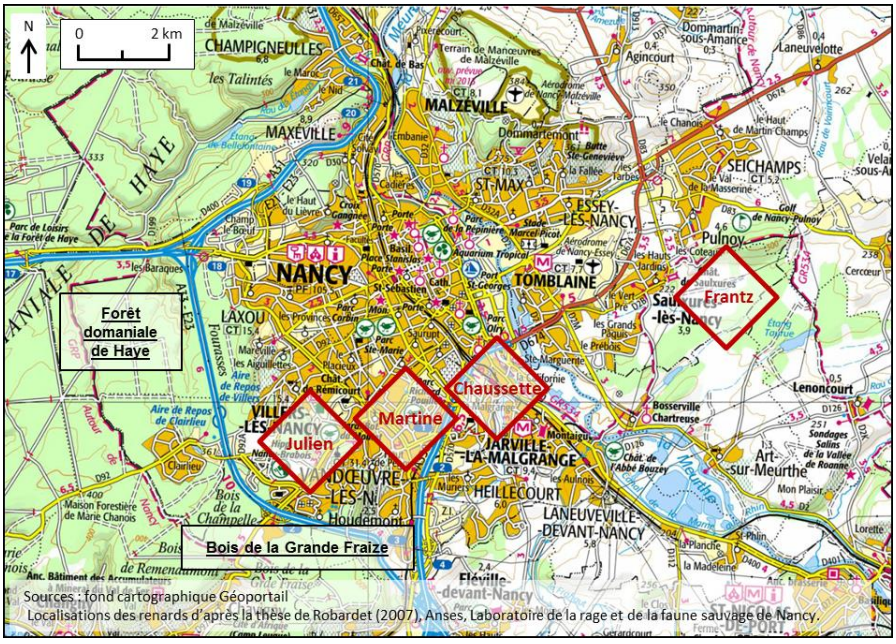


Figure II.12. Carte de la périphérie de Nancy et des communes alentour. Le centre de l'ensemble des localisations de chaque renard est représenté par un symbole ponctuel.

2.2.4. La RNCFS de La Petite Pierre

Le relief sur la RNCFS de La Petite Pierre est composé de collines, comme illustré en Figure II.13, l'altitude variant entre 180 et 420 m. La réserve se situe au niveau d'un resserrement est-ouest du relief et du couvert forestier vosgien, juste à l'ouest de Saverne. La limite orientale de la réserve surplombe la plaine alsacienne occupée par des villages et principalement des prairies et des vergers. À l'ouest se termine le plateau lorrain. Au nord, le massif forestier vallonné est continu au-delà de la frontière allemande. Les Vosges du nord dans lesquelles est située la RNCFS, reposent sur des formations de grès rose (PNR des Vosges du Nord, 1997). Au sud, le massif vosgien se prolonge au-delà de Saverne culminant à des altitudes plus élevées jusqu'à 1400 m. Le climat y est semi-continental. La réserve est entièrement incluse dans le milieu forestier et est composée des forêts domaniales[17] de La Petite Pierre Nord et de Bouxwiller. Les essences forestières présentes sur la réserve sont réparties à peu près équitablement entre feuillus et conifères. Il s'agit majoritairement de hêtres, de sapins blancs ainsi que de chênes sessiles, de charmes, d'épicéas et de pins sylvestres (Storms *et al.*, 2004). Ce peuplement est à l'image de celui de l'ensemble du massif forestier vosgien (IFN, 2007). Concernant l'hydrographie, un cours d'eau principal est présent au centre de la réserve, la rivière Fischbaech. Deux autres rivières longent la réserve à l'ouest, au sud et à l'est.

Des axes routiers départementaux entourent la réserve, en la longeant à l'ouest et au sud. Au sud, l'autoroute de l'est passe à 3 km. Le tracé de la Ligne à Grande Vitesse est-européenne passe également au sud, à proximité de l'autoroute via un tunnel percé sous Saint-Jean de Saverne. La construction du tronçon a commencé en 2010 et doit durer quatre ans. Plusieurs passages à faune sont prévus dans le projet (RFF, 2011). Les suivis des animaux analysés dans la thèse sont cependant antérieurs aux travaux de la ligne, qui n'influencent donc pas les déplacements de la faune.

La RNCFS est située dans le Parc Naturel Régional (PNR) des Vosges du Nord. Le site d'étude s'étend sur 30 km², et administrativement sur trois communes : La Petite Pierre, Neuwiller-lès-Saverne et Dossenheim-sur-Zinsel. Le statut de RNCFS dont les termes sont à présent définis par un décret datant de 2005, va de pair avec des missions particulières. Les RNCFS ont une vocation de protection des milieux et des espèces remarquables. Elles représentent des terrains expérimentaux pour des études sur la faune et sur leur gestion (Charlez, 2007). La Petite Pierre entre dans ce cadre avec comme principales espèces étudiées, le cerf, le chevreuil et le sanglier. C'est actuellement l'unique réserve de grande faune et de milieu forestier en France. Elle est gérée par l'ONCFS et l'ONF. Elle comprend des ZNIEFF et fait partie du réseau Natura 2000 Directive Oiseaux et Directive Habitats. La réserve a un accès public réglementé. Elle est interdite à tout véhicule, motorisé ou non. Elle est accessible la journée pour les randonneurs et dans la limite des chemins balisés. Il n'y a cependant pas de clôtures, ce qui permet à la faune de circuler librement en passant les frontières de la réserve.

[17] Une forêt est définie par l'IFN (2006) comme une zone boisée d'au moins 5 ares disposant d'un couvert apparent de plus de 10 % de la surface du sol.
Une forêt domaniale est une propriété de l'état et est gérée par l'Office National des Forêts.

Figure II.13. Paysage dans le PNR des Vosges du Nord. La faune évolue dans un milieu forestier et vallonné avec des pentes plus ou moins fortes. Routes et chemins sont présents dans la RNCFS mais ils ne sont accessibles que pour un accès piétonnier.

Du fait de la réglementation de la RNCFS, relativement peu de perturbations anthropiques sont observées vis-à-vis de la faune sauvage. Quelques hameaux sont présents dans la réserve principalement en bordure. L'activité cynégétique est soumise à un plan de chasse défini pour la réserve à des dates réglementaires (Klein *et al.*, 2011). En dehors des cervidés, de nombreuses espèces de faune sont susceptibles de se déplacer dans la RNCFS, de la petite faune – écureuil roux, plusieurs espèces de chiroptères – à des espèces plus grandes comme le sanglier et le lynx[18].

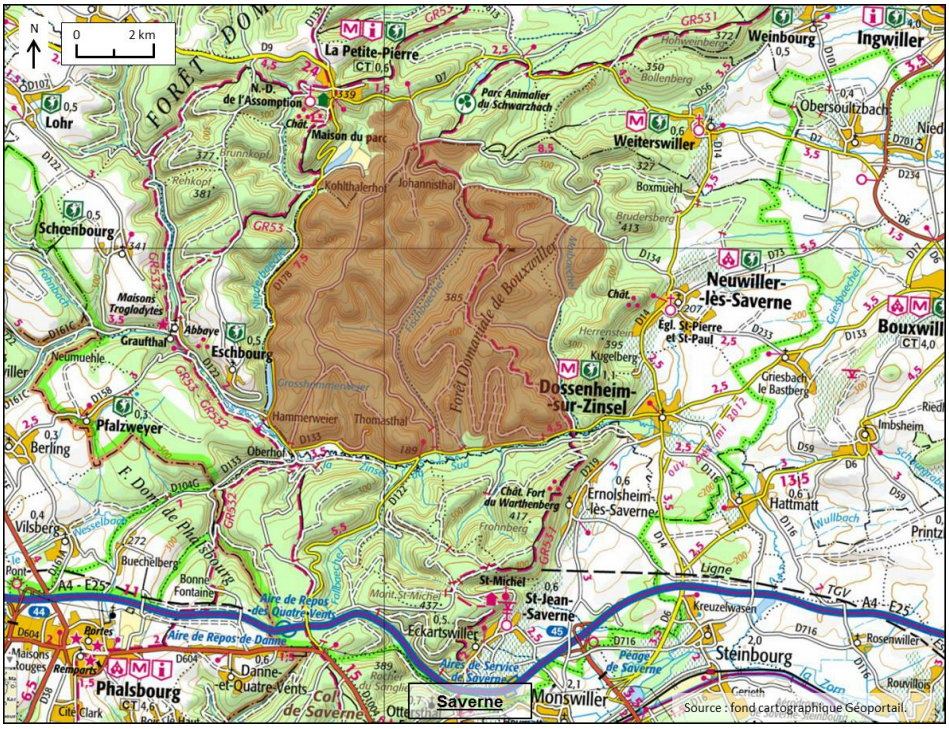


Figure II.14. Carte de la RNCFS de La Petite Pierre dont l'emprise est grisée.

Le suivi des chevreuils et des cerfs s'effectue sur l'ensemble de la RNCFS dont l'emprise est cartographiée sur la Figure II.14. L'échantillon de données de déplacements concerne trois chevrettes (femelles du chevreuil) – Céline, Comédienne et Séphora – et trois biches (femelles du cerf) – Étoile, Uka et Uzarusse. Les localisations enregistrées demeurent dans les limites de la réserve. Leur domaine de vie est donc a priori peu contraint par les constructions anthropiques.

[18] Source : PNR des Vosges du Nord, recensement 2007 des espèces présentes dans le parc.

L'environnement naturel représente alors un élément important dans la détermination de leurs déplacements.

2.2.5. Le canton d'Aurignac

Le site d'étude des chevreuils suivis par le CEFS de l'INRA se situe au nord du canton d'Aurignac dans le département de la Haute-Garonne. Il inclut les lieux de captures des animaux pour la pose de colliers GPS et s'étend sur environ 80 km², même si les chevreuils peuvent s'en éloigner. La carte de la Figure II.15 ne couvre pas l'ensemble de l'emprise des localisations car certains déplacements de dispersion s'effectuent sur plusieurs kilomètres. La description du site se trouve entre autres dans les articles de Hewison *et al.* (2009) et Coulon *et al.* (2008). Nous reprenons ici les caractéristiques principales. Le relief est vallonné entre 220 et 380 m, à une trentaine de kilomètres de la chaîne des Pyrénées. Le climat y est caractérisé comme océanique altéré. L'occupation du sol est principalement dédiée à des prairies et des cultures. Le couvert forestier est fragmenté avec cependant deux grandes forêts, celle de Fabas au centre du site et celle de Mauboussin au sud. Plusieurs lacs sont sur le site, et trois rivières principales occupent des fonds de vallées dont deux au nord (l'Aussoue et le Touch) et une traversant le sud d'ouest en est (la Nère). Le site d'étude est éloigné des grandes agglomérations : St-Gaudens est situé à environ 25 km, Toulouse et Auch sont à une cinquantaine de kilomètres. Elle est constituée uniquement par des communes rurales[19]. Les routes sont d'importance secondaire, l'axe autoroutier Toulouse-Tarbes passant plus à l'est et au sud du site. La voie ferrée la plus proche longe l'autoroute, elle-même à proximité du fleuve de la Garonne.

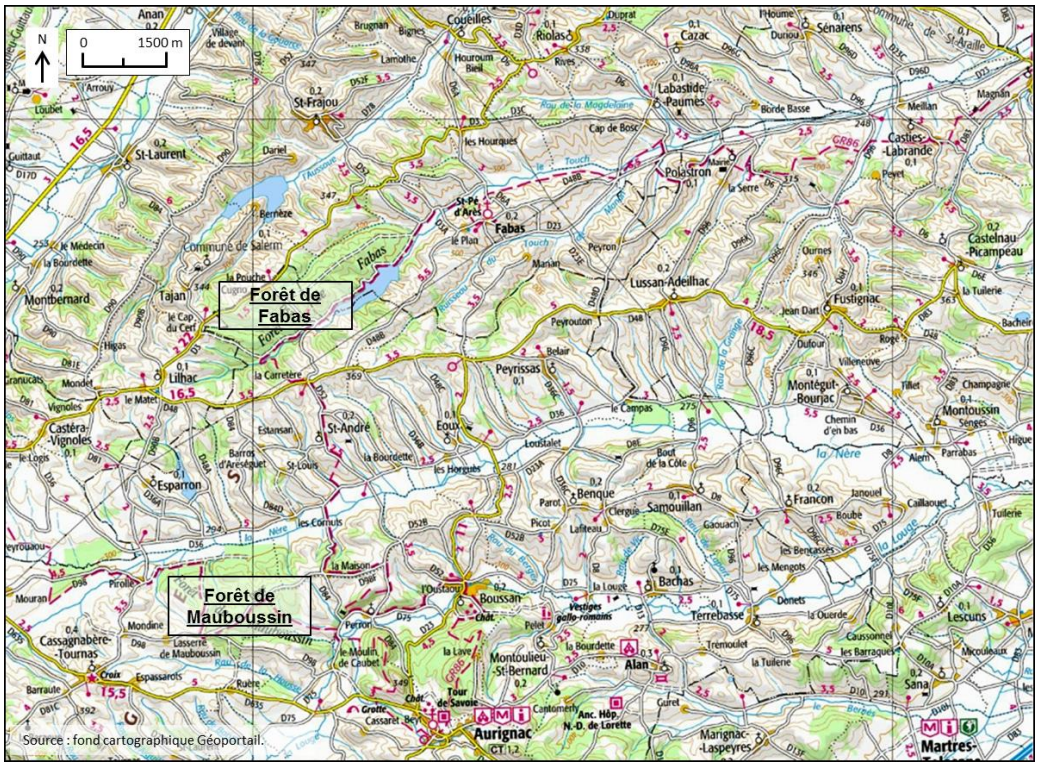


Figure II.15. Le site d'étude au nord d'Aurignac où les études sur le chevreuil sont menées par le CEFS-INRA.

[19] Selon l'INSEE, une commune rurale possède moins de 2000 habitants et son bâti est discontinu avec des distances de plus de 200 mètres.

Les données de déplacements concernent soixante-dix chevreuils, quarante femelles et trente mâles, équipés de colliers GPS. Les captures effectuées par le CEFS sont réalisées tous les hivers pour poser les colliers. Ceux-ci sont récupérés généralement à la fin de la même année. Les chevreuils capturés sont nommés et des prélèvements sont effectués afin de suivre leur état de santé. L'échantillon de données porte sur les années 2008, 2009 et 2010. Les classes d'âge sont établies ainsi : jeune, yearling c'est-à-dire entre un et deux ans, et adulte. La ventilation des données selon les individus et les suivis est indiquée dans le Tableau II.1.

Tableau II.1. Suivis des chevreuils. La première colonne correspond aux caractéristiques des individus, par sexe, âge et lieu principalement parcouru pendant la durée de suivi. La seconde colonne dénombre les suivis, un même individu pouvant être capturé plusieurs années.

par individu			**par suivi**		
	nombre	*pourcentage*		nombre	*pourcentage*
total	70	*100*	total	77	*100*
femelle	40	*57*			
mâle	30	*43*	année 2008	24	*31*
jeune	38	*54*	année 2009	23	*30*
yearling	8	*11*	année 2010	30	*39*
adulte	24	*34*			
forêt de Fabas	4	*5*	forêt de Fabas	5	*6*
autres forêts	20	*26*	autres forêts	22	*29*
couvert boisé fragmenté	46	*60*	couvert boisé fragmenté	50	*65*

Le grand nombre de suivis et de chevreuils est intéressant d'un point de vue de la diversité des comportements de déplacements. Le site d'étude couvre des zones plus ou moins boisées, avec des constructions anthropiques plus ou moins denses et fréquentées. Cela permet de visualiser différents types d'espace et différentes descriptions par les données géographiques.

2.3. Connaissances sur le comportement des espèces étudiées

L'analyse des déplacements et de leurs relations avec les éléments du paysage fait appel, lors de l'interprétation des résultats, à une connaissance du comportement des espèces étudiées. Le renard, le chevreuil et le cerf sont trois espèces qui ont fait et font l'objet de nombreuses études en écologie et en éthologie. Nous reprenons ici les résultats de quelques-unes de ces recherches, en particulier ceux relatifs au comportement spatial des espèces en question. Nous résumons quelques caractéristiques générales, essentielles pour expliquer l'utilisation de l'espace par les individus et leurs déplacements. Les déplacements sont l'expression des activités, motivées par des nécessités biologiques. Comme montré dans le Tableau II.2 et en Figure II.16, les différences physiques sont importantes. Elles peuvent induire des différences dans les déplacements et l'occupation de l'espace.

Tableau II.2. Résumé des caractéristiques morphologiques et biologiques générales des espèces étudiées. Il s'agit d'ordres de grandeur. Source : ressources en ligne de l'ONCFS [http://www.oncfs.gouv.fr/] et de l'ONF [http://www.onf.fr/].

Caractéristiques	renard roux (F) renarde (M) renard	chevreuil européen (F) chevrette (M) brocard	cerf élaphe (F) biche (M) cerf
Hauteur au garrot	30 à 40 cm	60 à 80 cm	(F) 1 m (M) 1,30 m
Masse corporelle	6 à 10 kg	20 à 25 kg	(F) 90 à 130 kg (M) 160 à 230 kg
Durée de vie	2-3 ans (10 ans en captivité)	10-15 ans	15-20 ans

Figure II.16. Photographies, remises à l'échelle par rapport à la hauteur au garrot, des mâles du renard et du chevreuil, ainsi que d'une biche et d'un cerf.

Chez le renard et le chevreuil, le dimorphisme sexuel est faible. Les femelles sont légèrement plus petites et légères que les mâles, d'un rapport d'environ 1,1. Chez le cerf, la différence est plus marquée, d'une part par le port de bois par les mâles, et d'autre part par un rapport de masse corporelle de l'ordre de 1,5.

2.3.1. Le renard roux

Le renard est une espèce identifiée en France comme l'un des symboles de biodiversité, certes ordinaire mais associée à une nature non domestiquée (Rivals & Artois, 1996). Sa présence en zone urbanisée peut être interprétée comme encourageant pour l'intégration de la faune sauvage en ville. Cependant, le renard est également le vecteur potentiel de plusieurs maladies. Il est aussi associé aux attaques sur les élevages et à une prédation sur les gibiers en compétition avec les prélèvements cynégétiques. Ces multiples points de vue sont à l'image de son adaptabilité comportementale et de la diversité des milieux et des occupations de l'espace par les populations humaines qu'ils côtoient.

Caractéristiques biologiques et milieux de vie de l'espèce

L'aire de répartition naturelle du renard roux est vaste. Elle s'étend sur la quasi-totalité de l'Europe, de l'Asie et de l'Amérique du nord, avec une présence dans le nord de l'Afrique. Le

renard est un carnivore avec un régime alimentaire omnivore. Sa nourriture peut donc être très variée. Il montre pourtant des préférences marquées pour les lapins de garenne et les micromammifères comme les espèces de campagnol. Par exemple, dans Poulle (1991), les renards étudiés sur un site lorrain ont une consommation préférentielle de campagnols communs (*Microtus arvalis*), même lorsque cette espèce est peu présente sur leurs terrains de chasse. Le spectre alimentaire étant large, il s'adapte aux ressources abondant selon les saisons. Les populations de micromammifères sont les plus importantes en été et en automne, ce qui permet une prédation ciblée. L'opportunisme est valable pour les autres ressources : les jeunes des autres espèces en été, comme de jeunes oiseaux ou même de jeunes faons (Panzacchi *et al.*, 2008), des invertébrés, des fruits en automne, des charognes en hiver. Cependant, de fortes corrélations existent entre le prédateur et ses proies de prédilection. Les dynamiques de populations de lapins et de campagnols peuvent agir sur le nombre de renards, par exemple lors de la diminution observée suite à des hécatombes de lapins par myxomatose (Lloyd, 1980).

L'espèce est considérée comme généraliste, c'est-à-dire avec une niche écologique étendue. Cela implique un spectre alimentaire large et des milieux d'habitat variés. En France, le renard s'est adapté aux changements du territoire et d'occupation du sol. Au Moyen-âge, c'est un animal de plaine. Il se réfugie dans les forêts face à l'intensification de l'agriculture et de l'exploitation du bois (Alexandre-Bidon *et al.*, 2005). Au XXème siècle, il a reconquis la plupart des milieux et s'est notamment installé dans les zones urbanisées. La colonisation des villes par les renards a d'abord été observée en Grande-Bretagne, à Londres par exemple, dès les années 1930 (Teagle, 1967 dans Robardet, 2007). La capitale britannique est à présent le lieu de vie de nombreux renards, ce qui amène des interrogations sur la gestion de cette espèce dans un espace urbain. Des questions se posent en effet sur les mesures de régulation du nombre d'individus, peu efficaces jusqu'à présent, et sur le changement de statut de l'espèce qui n'est pas classée nuisible en Angleterre. Les mesures de prévention proposées passent notamment par l'éducation des habitants par rapport aux comportements et aux aménagements à adopter pour prévenir les dérangements par les renards[20]. Ce n'est que quarante ans plus tard que le phénomène du renard urbain se retrouve ailleurs que dans les villes britanniques (Raton, 2004). Plusieurs explications à cette présence du renard en ville sont avancées. Une des causes pourrait être liée au développement des villes et à l'expansion des banlieues résidentielles. La faible densité du bâti et la présence de jardins constituent des lieux d'habitat propices et favorisent la circulation des renards (Harris & Rayner, 1986). La présence permanente de ressources alimentaires laissées par les hommes est un élément intéressant pour les renards (Contesse *et al.*, 2004). Un autre facteur, celui des épidémies, influe sur le nombre de renards et donc sur leur colonisation de nouveaux milieux. La rage a touché directement le renard dans l'est de la France dans les années 1970, entraînant une réponse sanitaire par des campagnes de réduction d'effectifs. La solution alternative de lutte par vaccins oraux a ensuite permis d'enrayer la progression du front de la maladie et a fait diminuer les tirs de renards (Chautan *et al.*, 2000).

Nos cas d'étude concernent ce qui est à présent appelé le « renard urbain ». Il n'y a néanmoins pas de distinction génétique entre les populations dites urbaines et celles dites rurales. La séparation des modes de vie en fonction du milieu ne semble pas si franche. Elle ne freine a priori pas les échanges entre individus et les migrations ponctuelles ou définitives entre les zones urbanisées et les zones rurales (Wandeler *et al.*, 2003). Même si le renard peut vivre dans plusieurs types de milieux, certains éléments du paysage influencent sa présence et favorisent la sélection d'un habitat en particulier. Son domaine de vie doit comprendre des sites appropriés pouvant servir de gîtes de repos. Plus particulièrement au printemps, le renard doit disposer d'un terrier ou apparenté pour élever les portées de jeunes. Des ressources en nourriture, même variées, doivent également être disponibles, que ce soit en zones urbanisées ou rurales. Poulle

[20] Source administrative du Grand Londres : [http://www.rbkc.gov.uk/]

(1991) a étudié l'utilisation des aires d'activités de plusieurs renards en zone rurale, notamment l'exploitation des lieux de ressources et l'emplacement des gîtes de repos. Ces deux aspects font l'objet d'une sélection préférentielle par les individus, avec des aires recouvertes en majorité de prairies et de forêts. La préférence vers les prairies pour l'installation des terriers, temporaires ou de mise bas, est aussi observée par Nakazono & Ono (1987) chez les renards roux du Japon. La composition du domaine vital des renards est importante pour la compréhension de ses déplacements car elle est liée aux motivations des différents types de déplacements.

Les déplacements

Le renard a un mode de vie généralement nocturne. Il se repose le plus souvent pendant la journée et cherche des ressources la nuit, en incluant le crépuscule et l'aube. Il se déplace alors davantage pendant la période nocturne, consacrée à la chasse et à la recherche de nourriture. Les déplacements sont en majorité effectués entre différents gîtes diurnes le jour, et entre zones de ressources la nuit (Meia, 1994). Selon la composition du domaine vital et le milieu occupé, ses ressources alimentaires peuvent être trouvées dans des prairies, des champs de culture, des lisières de forêts, des vergers. Les habitations humaines sont attractives par les déchets déposés à proximité qui peuvent contenir des restes de nourriture. À une échelle régionale, Delattre *et al.* (1998) notent que les renards sont influencés dans leurs déplacements par les zones de pullulation des rongeurs, déplacements qui s'apparentent à des migrations temporaires ou permanentes motivées par l'abondance de ressources. Les petits mammifères étant soumis à des variations cycliques de population au cours d'une année et sur plusieurs années, les moments et les zones de forte densité sont remarquées via le comportement alimentaire de leurs prédateurs. Dans Meia (1994), les déplacements des renards sont étudiés par radiopistage. Plusieurs types de déplacements sont caractérisés, entre déplacements quotidiens dans le domaine vital et excursions en dehors de celui-ci. Cette étude distingue par ailleurs trois catégories d'individus qui présentent des déplacements caractéristiques : les sub-adultes avant leur dispersion, les adultes qui possèdent une bonne connaissance de leur domaine vital et font majoritairement des déplacements vers des lieux de ressources, et enfin des renards qui présentent de nombreux déplacements erratiques c'est-à-dire qu'ils ne suivent pas des parcours identiques à chacune de leur sortie.

Les relations sociales et les interactions entre les individus influencent aussi les déplacements. Les renards sont généralement solitaires. Des rencontres sont cependant observées lors de déplacements nocturnes ou lors de partages d'un gîte de repos diurne (Poulle, 1991). Le recouvrement entre domaines vitaux est d'ailleurs fréquent par le partage des gîtes et celui des zones de ressources. La notion de territoire, qui par rapport à celle de domaine vital, inclut une défense de l'espace vis-à-vis des autres individus, est peu marquée chez l'espèce (Robardet, 2007). Autrement que par domaines de vie superposés, les rencontres effectives sont aussi observées lors de suivis d'individus par radiopistage (Henry, 2004). Les interactions sociales restent pourtant limitées en dehors des périodes d'accouplement et de l'élevage des jeunes. Après les naissances, les femelles restent à proximité des terriers, les mâles leur apportant généralement la nourriture. Les distances de déplacements sont corrélées avec la taille des domaines vitaux. Ceux-ci présentent une variabilité interindividuelle forte, sans distinction entre les mâles et les femelles. Les domaines vitaux sont généralement plus grands lorsque les ressources sont moins abondantes. Les déplacements sont donc plus nombreux dans ce cas et la recherche de nourriture s'effectue sur de plus longues distances.

Quelques effets des conditions météorologiques sur les déplacements ont été observés. Meia (1994) note une légère diminution des distances parcourues lors d'épisodes pluvieux ou de brouillard. Les variations saisonnières interviennent dans les déplacements du fait des opportunités de ressources. La présence du renard dans des prairies, des cultures ou en forêt est

liée avec les ressources disponibles (Cavallini & Lovari, 1991). L'enneigement est associé à des parcours particuliers, par exemple une chasse ciblée le long des frontières de fonte de neige. Certains éléments du paysage comme les haies, les bosquets et les lisières sont de manière générale exploités lors de la chasse des micromammifères, comme indiqué dans Note & Poix (2006).

Les capacités de déplacements des renards s'expliquent par ses caractéristiques physiques. Quelques descriptions peuvent être citées :

> « Pour expliquer sa silhouette, son allure, son aptitude à la course, il faut évoquer le squelette, les muscles, etc. ; on voit alors une charpente légère, bien articulée, haut jointée permettant des mouvements souples en tous sens. Architecture flexible, taillée ou dessinée « pour » une chasse silencieuse et invisible. » (Rivals & Artois, 1996).
>
> « Piètre grimpeur, c'est un excellent marcheur. Il trotte, saute ou nage sans problème. »[21]
>
> « Dans ses déplacements, le renard est silencieux. Le plus souvent, il trottine pour arpenter son domaine. À cette vitesse de croisière, il peut parcourir, au besoin, jusqu'à dix kilomètres en une nuit. Son endurance lui permet de courir sur de longues distances s'il doit échapper à des poursuivants déterminés. »[22]

Les vitesses de déplacement dépendent de l'activité : exploration d'une zone, déplacement dirigé vers une cible connue, fuite en réponse à un danger. Celles-ci peuvent donc être très variables, avec une vitesse de pointe autour de 50 km/h. La chasse aux micromammifères et aux oiseaux correspond à des déplacements particuliers. Le renard se déplace alors discrètement et peut ramper près du sol. Il « mulote » alors, verbe dédié au bond effectué avant de surprendre sa proie. Les distances parcourues varient en fonction des individus et des circonstances. Adkins & Stott (1998) observent des renards dans la périphérie de Toronto parcourant jusqu'à 20 km par nuit. Pour Meia (1994), les distances parcourues en moyenne par nuit sont comprises entre 4 et 12 km. Des distances exceptionnelles de parcours ont déjà été enregistrées, au-delà de 50 km, comme par exemple lors de retour suite à des délocalisations forcées (Rogers, 1988).

Du fait de sa capacité à sauter et à nager, les obstacles aux déplacements sont a priori des formes du terrain abruptes telle une paroi verticale, et des infrastructures hermétiques comme des murs et des clôtures solides. Le renard grimpe peu dans les arbres, même si cela lui reste possible (Dupérat, 2005). Les axes routiers constituent un obstacle dans le sens où ils représentent des perturbations – bruit, présence possible de personnes – et surtout un danger. De nombreux individus de renards sont tués par des collisions avec des véhicules comme vu précédemment (Conruyt-Rogeon & Girardet, 2012). Par exemple sur un tronçon d'autoroute d'environ 50 km dans l'est de la France, environ 80 cadavres de renards ont été relevés en 3 ans (Joveniaux, 2005). Pendant la même période, sur un autre tronçon d'autoroute de 50 km sur l'A28 entre Alençon et Le Mans, au moins 50 renards ont été tués (Sétra, 2005). La mortalité est la plus élevée lorsque les jeunes s'émancipent, en été et en automne. Rosatte & Allan (2009) constatent ainsi une mortalité par des collisions routières lors des dispersions juvéniles en automne. Ces déplacements de dispersion sont constatés sur une vingtaine de kilomètres en moyenne par rapport aux lieux de naissance. Les passages à faune montrent une certaine efficacité chez les renards. Les individus semblent emprunter d'autant plus les passages lorsque ceux-ci sont situés dans un environnement spatial favorable, par exemple lorsque le couvert boisé est important (Rodríguez et al., 1997). Les obstacles peuvent être aménagés pour empêcher la traversée comme des grillages serrés le long des routes (Sétra, 2008). Il est probable que de grands éléments structurants du paysage jouent un rôle de barrière aux déplacements des renards, comme par exemple les grands fleuves et rivières qui limitent les déplacements d'autres mammifères. Smith *et al.* (2002) font cette hypothèse à partir de

[21] Citation sur le site Web de l'association Ligue ROC [http://www.roc.asso.fr/ligue-roc/]

[22] Citation du Larousse Encyclopédie, en ligne [http://www.larousse.fr/encyclopedie]

l'analyse de la propagation de la rage par les ratons laveurs dans le Connecticut. L'effet de barrière est surtout dû aux aménagements des berges des cours d'eau importants qui rendent difficile l'accès à la rive, et au fréquent couplage avec des axes de transport. D'autres éléments du paysage sont favorables aux déplacements. Les voies de chemin de fer semblent utilisées comme lieux de passage (Trewhella & Harris, 1990). Kolb (1984) a observé des dispersions de juvéniles le long de voies ferrées ainsi qu'une augmentation de la taille des domaines vitaux lorsqu'un tronçon était à proximité. En zone urbaine, les espaces verts semblent préférentiellement parcourus par les renards (Rosatte & Allan, 2009). En milieu rural, les haies peuvent être utilisées comme lieu de gîte, et par extension comme chemin de déplacement (Liagre, 2006).
Les éléments du paysage jouent donc un rôle dans les déplacements du renard, car ils peuvent représenter des obstacles ainsi que des voies favorisant les déplacements. Le renard possède une capacité d'adaptation importante à son environnement, ce qui lui permet de répondre à des modifications du paysage, soit en s'accommodant de son territoire ainsi changé, soit en migrant vers une nouvelle zone. Il est intéressant de prendre en compte son comportement généraliste dans les multiples relations entre ses déplacements et le paysage.

2.3.2. Le chevreuil

La population de chevreuil a fortement augmenté en France depuis les années 1980[23]. Le chevreuil est une espèce communément rencontrée. Elle fait partie de la « grande faune », dont elle a partagé les évolutions de populations en France et en Europe (Boussin, 2006). La gestion de cette espèce est encadrée par les plans de chasse, représentant le plus grand nombre d'attributions et de réalisations après le sanglier (environ 488 000 réalisations pour le chevreuil, 48 000 pour les cerfs et 56 9000 pour le sanglier pour la saison 2008-2009 d'après l'ONCFS). La gestion sylvo-cynégétique est à présent une préoccupation afin de limiter les éventuels dégâts occasionnés par les chevreuils, en particulier dans les milieux forestiers, et de permettre ainsi un accueil des populations de cette espèce et des autres herbivores (Klein *et al.*, 2008). L'homme est intervenu et intervient sur cette faune sauvage en organisant sa distribution. La société cherche un compromis entre une nature dérangeante dans un territoire couvert dans sa quasi-totalité par les activités humaines, et une absence de faune sauvage préjudiciable.

Rythme de vie et types de déplacement

Les chevreuils peuvent vivre en moyenne entre 10 et 15 ans. Les naissances ont lieu en mai et en juin. Les jeunes restent sur le domaine vital de leur mère pendant environ un an. Les faons restent peu mobiles les premiers mois, réduisant de même les déplacements de la mère. L'éclatement de ce noyau familial intervient l'été suivant. Deux stratégies existent : la philopatrie ou la dispersion (Debeffe *et al.*, 2012). La philopatrie concerne les jeunes chevreuils – ou yearling – qui restent dans un espace à proximité de celui parcouru pendant leur première année. Ceux-ci peuvent aussi se disperser, c'est-à-dire s'éloigner du lieu de leur naissance. Les adultes se limitent ensuite à un espace de vie relativement restreint, souvent de moins de 1 km². Certains individus, mâles ou femelles, peuvent néanmoins parcourir de grandes distances hors de leur domaine vital au cours de la période de reproduction, jusqu'à plus de 10 km (Mysterud, 1999). La Figure II.17 montre la chronologie des comportements des jeunes chevreuils.

[23] Source : [http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/]

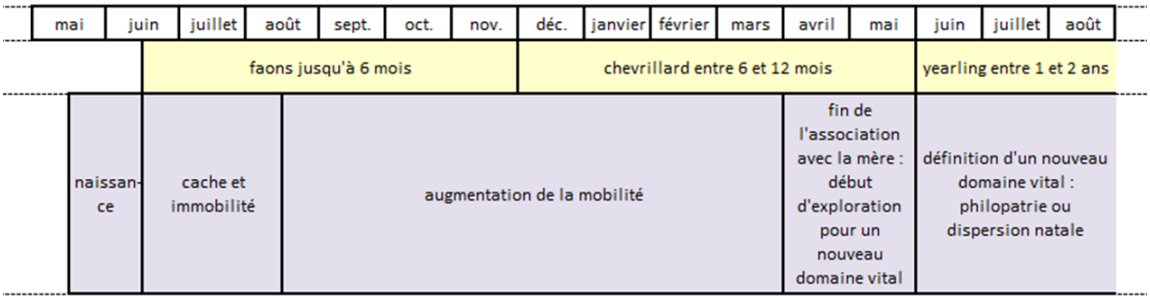


Figure II.17. Chronologie du comportement des jeunes chevreuils : leurs déplacements influencent ceux des femelles, avant la sélection d'un nouveau domaine vital. D'après Thomas (2003).

Le mode de vie des chevreuils est majoritairement solitaire, contrairement à celui du cerf par exemple. Les femelles élèvent seules les jeunes, entre un et trois par portée, généralement deux. Les brocards, chevreuils mâles, défendent un territoire à la sortie de l'hiver jusqu'à la fin de la période de rut en septembre-octobre. Ils peuvent partager leur domaine vital, notamment lorsque les ressources sont moins abondantes comme pendant la période hivernale. En hiver également, de petits groupes peuvent se former (Anciaux & Libois, 1990). L'espèce est dite densité-dépendante. Elle est sensible à la densité d'individus de son espèce, ainsi qu'à la densité des autres espèces. Le chevreuil peut adapter son comportement. Par exemple, il a été observé des corrélations entre la surface des domaines vitaux et la densité de chevreuils, et de même, entre cette surface et la qualité de l'habitat. Lorsque le domaine de vie est riche en nourriture intéressante pour le chevreuil, sa superficie a tendance à diminuer (Saïd *et al.*, 2005). Plus la densité des chevreuils est grande, plus les déplacements des individus sont limités, ce qui a pour conséquence de diminuer la surface des domaines vitaux et potentiellement la quantité de ressources par individu (Saïd *et al.*, 2009). La densité de population a également un effet sur les traits physiques. Un forte densité peut avoir un effet de réduction de la masse corporelle des jeunes (Cobben *et al.*, 2009). Des phénomènes de compétition interspécifique ont été observés entre la densité de cerfs élaphes et la masse des faons de la population de chevreuil sur une même zone d'étude (Richard *et al.*, 2010). Un indicateur de changement écologique (ICE) est utilisé : il prend en compte la masse corporelle des chevrillards (chevreuils entre 6 et 12 mois) afin d'évaluer la qualité des habitats et leur capacité d'accueil en population d'ongulés (ONCFS, 2008). Cela permet de réguler les populations et d'adopter des mesures de gestion pour la qualité des habitats (Klein *et al*, 2008).

Du point du vue de sa capacité de déplacement, le chevreuil possède des traits physiques qui lui permettent de courir à des vitesses atteignant 70 km/h. Il peut effectuer des sauts jusqu'à 2 mètres en hauteur. Sa taille en fait le plus petit cervidé d'Europe (ONCFS, 2007). Sa stratégie face à la prédation ou à un danger peut consister à fuir, mais sur des courtes distances. Sa meilleure protection consiste à se réfugier et à rester hors de vue (Thomas, 2003). Anciaux & Libois (1990) écrivent par exemple :

> « Sa petite taille (70 cm au garrot), ses jambes postérieures plus longues que les antérieures lui confèrent une remarquable habilité à se mouvoir dans les fourrés. »

Les chevreuils peuvent être considérés comme sélectifs dans leurs ressources alimentaires car ils montrent de nettes préférences pour certaines essences végétales, ligneuses ou semi-ligneuses. Lorsque leur habitat le permet, ils se dirigent majoritairement vers le chêne, le charme, le frêne ou des résineux comme le sapin ou le pin. Leur alimentation dépend aussi de la disponibilité des ressources et des saisons : les feuilles d'arbres au printemps et en été, et des semi-ligneux comme l'aubépine, la ronce, le myrtillier aux autres saisons (ONCFS, 2007). Les chevreuils, comme beaucoup d'ongulés sauvages, apprécient les jeunes pousses ainsi que l'écorce des

arbres. Ces prédations respectivement nommées abroutissement et écorçage, contrarient la régénération des essences. Ils se frottent également sur les troncs d'arbres soit au moment du renouveau de leurs bois soit pour les marquages territoriaux en période de rut. Les dégâts qui en résultent motivent les politiques de gestion de l'espèce en milieu forestier (Hamard & Ballon, 2009). Les chevreuils sont des « income breeder », c'est-à-dire que leur recherche de nourriture est régulière et qu'ils ne font pas de réserves énergétiques (Saïd *et al.*, 2005). C'est une espèce stressée qui s'alimente toutes les trois à six heures. Les chevreuils sont par ailleurs des ruminants qui alternent des phases de nourrissage et de rumination. Leurs déplacements sont fonction de leurs activités. La Figure II.18 liste les activités quotidiennes d'un chevreuil.

Période de la journée	Activité	Lieu
5 h – 9 h	activité importante : recherche de nourriture	/ gagnage du matin
9 h – 13 h	activité globalement faible : repos	/ sites de repos où le chevreuil est principalement couché
13 h – 17 h	activité restreinte : repos et alimentation	/ sites de repos et lieu de ressources
17 h – 21 h	activité importante : recherche de nourriture	/ gagnage du soir
21 h – 1 h	activité de recherche de nourriture	/ gagnage du soir
1 h – 5 h	activité restreinte : repos et alimentation	/ sites de repos et lieu de ressources

Figure II.18. Rythme quotidien du chevreuil. Les déplacements sont liés aux phases de recherche de nourriture en alternance avec des périodes de repos. Cette chronologie est générale et ne prend pas en compte les adaptations en fonction de la saison (élevage des jeunes par exemple). D'après Arbouet (2006).

Les déplacements ont principalement lieu lors des phases d'alimentation et dans des lieux de présence de ressources. La rumination se superpose avec les phases de repos et de relative immobilité. Le chevreuil est considéré comme passant environ la moitié du temps couché (Baltzinger, 2003). Les individus peuvent modifier légèrement leur rythme selon la saison. Les réponses saisonnières en termes de déplacements et d'activités peuvent varier. Les déplacements peuvent être moindres en hiver, entre autres si un groupe s'est formé ; le temps passé à s'alimenter peut par contre se dérouler sur des durées plus grandes (Gottardi, 2011). En hiver, la superficie du domaine vital peut s'accroître afin d'augmenter l'aire de recherche de nourriture (Saïd *et al.*, 2009 ; Cederlund, 1983). Les conditions météorologiques peuvent avoir une influence sur les déplacements, notamment via les ressources. Elles ont des conséquences sur l'espace parcouru. Par exemple, lors des périodes de sécheresse, les chevreuils ont tendance à se stabiliser autour des points d'eau car l'hydratation par les végétaux n'est plus suffisante (Bosquet, 2007). Le chevreuil est une espèce qui bouge dans l'espace correspondant à son domaine vital, c'est-à-dire dans un espace qui lui fournit les éléments nécessaires à sa survie. La disponibilité en ressources dans cet espace intervient dans les déplacements. L'emplacement des ressources alimentaires motivent les déplacements des chevreuils, qui agissent en retour sur la répartition des végétaux (Boulanger, 2010).

Influence du paysage sur les déplacements

La répartition géographique du chevreuil s'étend sur l'Europe et l'Asie. En France, il est présent en métropole sauf sur l'île de Corse (Klein *et al.*, 2008). Il vit dans de nombreux milieux et sa progression s'observe sur le pourtour méditerranéen et dans les étages montagnards et subalpins jusqu'à 2500 m (Gaudin, 1995). Son abondance est plus forte en forêt dont la progression en France a favorisé le développement de l'espèce[24]. Il peut aussi vivre dans des agrosystèmes, jusqu'à former un écotype[25] de chevreuil de plaine avec une consommation alimentaire différente (ONCFS, 2007 ; Denis *et al.*, 1998). Il peut adapter son régime alimentaire en fonction des ressources disponibles, sur son domaine vital et en fonction des saisons. Il est cependant sélectif dans le choix des essences consommées dans un espace donné, privilégiant les essences les plus énergétiques (Pellerin, 2005). Au niveau de la sélection de l'habitat, il montre une préférence pour les forêts de feuillus et pour les espaces de lisières (Arbouet, 2006). C'est une espèce d'écotone, c'est-à-dire de transition entre deux types de milieux. Les individus sont très sédentaires en dehors des phases de dispersion. Par exemple, les surfaces des domaines vitaux varient selon le contexte d'étude, autour de 30 ha dans Saïd *et al.* (2005), entre 50 et 100 ha dans Mysterud (1999) et Rossi *et al.* (2001). À l'intérieur du domaine vital, l'utilisation de l'espace n'est pas homogène. Le Corre *et al.* (2008) ont montré une exploitation préférentielle de lieux de ressources. Les habitats hétérogènes favorisent l'existence de lisières entre les différents types de végétation. Ils représentent un habitat riche en ressources, allant dans le sens d'une diminution de la taille des domaines vitaux et donc de la réduction des déplacements (Saïd & Servanty, 2005). Dans Morellet *et al.* (2011), la sélection de l'habitat est analysée en prenant en compte la composition du paysage : l'utilisation des éléments du paysage comme les zones boisées, les haies, les cultures, est comparée avec leur disponibilité en surface. Cette étude montre que les chevreuils peuvent utiliser les haies pour compenser une présence faible de zones boisées.

Les chevreuils se déplacent relativement peu en particulier lors de leur rythme quotidien. Ils ont pourtant une capacité à se déplacer rapidement et à franchir des obstacles en hauteur. Les milieux de vie des chevreuils sont variés mais l'espèce présente une sélection par rapport à son habitat. Plusieurs variables environnementales ont des conséquences sur ses caractères phénotypiques et sur la dynamique de population : poids des individus ou nombre de naissances par exemple. Le paysage a une influence sur la détermination des domaines de vie des individus ainsi que sur leurs déplacements quotidiens. Les déplacements sur de longues distances ont lieu lors des dispersions, soit natales soit de reproduction. Des obstacles ou des zones de couloir de déplacement peuvent influencer ses grands déplacements. Les effets du paysage sont visibles sur les rythmes d'activités des chevreuils et sur leurs déplacements. Gottardi (2011) a constaté que les déplacements étaient généralement moins fréquents pendant la journée chez les chevreuils vivant dans un milieu ouvert, c'est-à-dire avec peu de couvert forestier, que chez les chevreuils en milieu forestier. Ils ont par contre des déplacements plus fréquents la nuit, lorsque les dérangements humains sont moindres. Les chevreuils adaptent leurs déplacements en fonction des perturbations humaines. Les effets de la période de chasse ont été étudiés et des modifications du comportement ont été constatées. Pendant cette période, la vigilance des chevreuils est accrue et leur sélection alimentaire est moins stricte (Benhaiem *et al.*, 2008 ; Bonnot *et al.*, 2012 [2]). L'évitement des routes et des habitations est également attesté par le fait que les chevreuils, lorsqu'ils sont hors du couvert forestier, se tiennent à distance de ces

[24] Source : le Centre d'Études Biologiques de Chizé [http://www.cebc.cnrs.fr/]

[25] Définition d'un écotype d'après Lacoste et Salanon (1999) : « au sein d'une même espèce […], population[s] plus ou moins distincte[s] morphologiquement mais physiologiquement adaptée[s] à des habitats particuliers. […] les caractères des écotypes sont l'expression d'une différenciation de nature génotypique, et sont donc héréditairement transmissibles ».

constructions. Concernant le relief, Coulon *et al.* (2008) émettent l'hypothèse que les chevreuils utilisent d'avantage les crêtes en zones vallonnées afin d'avoir une meilleure vision de leur environnement. Cette préférence pour les positions surplombantes est aussi constatée par Ratikainen (2005). Des éléments du paysage peuvent être des obstacles aux déplacements d'un point de vue des capacités physiques : les grands fleuves notamment avec des berges aménagées peuvent avoir un rôle de barrière (Cosson *et al.*, 2006). Les routes représentent un danger de par les collisions et peuvent être définies comme une barrière au déplacement. Les clôtures empêchent d'autant plus les traversées si elles sont adaptées aux cervidés, c'est-à-dire avec des hauteurs d'au moins 2 m (Sétra, 2008). Calenge *et al.* (2005) ont suivi la dispersion de chevreuils après leur réintroduction dans un nouveau territoire. Ils constatent un effet de barrière du relief ainsi que du jumelage des infrastructures routières et des cours d'eau (comme mentionné précédemment pour le renard en 2.3.1).
Le chevreuil est une espèce sédentaire et ses déplacements interviennent dans le contexte de la sélection de l'habitat et des ressources alimentaires, ainsi qu'en fonction du cycle biologique des individus. Les obstacles et les zones favorables aux déplacements interviennent a priori dans la détermination du domaine vital, davantage que lors des déplacements quotidiens. Dans des paysages fragmentés, certaines infrastructures peuvent être des freins aux déplacements et notamment aux dispersions.

2.3.3. Le cerf élaphe

Le cerf a un impact sur son environnement proportionnel à sa taille (Boussin, 2006). Il consomme de grandes quantités de nourriture, environ 1 kg par jour (Suttie *et al.*, 1983). Il peut, par sa carrure, créer d'importants dégâts en milieu forestier. Comme le chevreuil, il se nourrit des jeunes pousses d'arbres et d'écorce, et abîme les arbres en s'y frottant (Hamard & Ballon, 2009). En France, la gestion du cerf a été marquée par des réintroductions réussies pendant la deuxième moitié du XXème siècle, faisant suite à des prélèvements excessifs par la chasse. De même que son espèce voisine le chevreuil, le cerf a connu une augmentation de ses effectifs, notamment depuis une vingtaine d'années. Il reste attaché aux massifs forestiers, même s'il montre une certaine plasticité comportementale et peut s'adapter dans d'autres milieux, comme dans les prairies en Nouvelle-Zélande (Netzer *et al.*, 2007) et dans la lande en Écosse (Staines, 1976).

Caractéristiques du domaine de vie

Le cerf est beaucoup plus grand et lourd que le chevreuil. Il représente un indicateur de la qualité de l'environnement car son développement physique dépend de la richesse de son habitat. Si les ressources sont faibles, la masse corporelle des individus diminue ainsi que le taux de reproduction (Bonenfant & Klein, 2004). Son cycle biologique et ses besoins influencent le choix de son domaine de vie. Celui-ci présente les caractéristiques générales suivantes.

- La forêt constitue le type d'habitat principal du cerf. C'est une espèce herbivore, alors que le chevreuil se nourrit surtout d'essences ligneuses (Anciaux & Libois, 1990). Il consomme des herbacées et des graminées qui constituent environ un tiers de son régime alimentaire. Celui-ci est complété par des semi-ligneux comme des ronces et par des feuilles d'arbres selon la disponibilité : chêne, sapin, épicéa par exemple (Krojerova-Prokesova *et al.*, 2010). Comme chez le chevreuil, la consommation de feuilles de hêtre est un indice de faible quantité de ressources ou de saturation de l'habitat par une population et elle permet de qualifier la qualité d'un habitat. Les cerfs vivent préférentiellement dans des forêts d'essences variées, de feuillus et de résineux, à proximité de zones dégagées.

- Des zones en milieu ouvert sont souvent présentes dans son domaine vital : clairières, prairies, cultures (Bouquier, 2003). Elles représentent des lieux de nourriture privilégiés. Le cerf y trouve des herbacées. Il fréquente aussi les lisières où se développent des espèces semi-ligneuses. Ces zones sont particulièrement parcourues lors des périodes de faibles dérangements humains et de grandes activités alimentaires chez les cerfs, à l'aube et au crépuscule.
- La présence d'eau est essentielle dans les domaines vitaux des cerfs. Les souilles sont des endroits boueux dans lesquels se frottent les animaux pour éliminer d'éventuels parasites[26].

La valeur refuge d'un habitat est un autre paramètre à prendre en compte dans la définition des domaines vitaux par les cerfs, outre leur valeur alimentaire (Baltzinger, 2003). Elle représente la possibilité pour les individus de se cacher ou de fuir facilement afin d'assurer leur tranquillité ou leur survie en cas de danger. Elle indique également la capacité de protection face aux intempéries :

- À l'échelle de l'habitat, le cerf dispose sur son domaine vital de lieux de refuge qui lui permettent de se cacher en cas de danger : prédation, chasse, dérangements anthropiques. Il s'agit alors d'être peu visible. La caractérisation de zones de protection s'effectue à l'échelle de l'habitat. La forêt constitue un milieu de refuge car le couvert végétal limite la découverte. Il semble que le cerf reste à proximité des zones boisées lors de ses déplacements en milieu ouvert. Lors de la période de mise bas, les femelles recherchent par ailleurs des endroits protégés où elles cacheront ensuite leur faon (un par portée, rarement deux).
- Des lieux sont sélectionnés par les individus dans leurs domaines vitaux lors des phases alternées de repos et de rumination. Ils sont appelés sites de repos ou reposées. Dans la thèse de Baltzinger (2003), les cerfs semblent distinguer ces sites par rapport aux lieux de nourrissage. Ils montrent en effet une préférence pour des reposées avec un masque visuel vertical et horizontal par la végétation, notamment d'essences résineuses. Cela permet de camoufler visuellement les individus ainsi que de les protéger des mauvaises conditions climatiques : vent, pluie, neige. Il y a alors une sélection de ses sites à l'échelle du microhabitat.

Rythme de déplacements

Le cerf est une espèce grégaire. Les individus se déplacent en hardes. Les femelles, les faons et de jeunes mâles de moins de deux ans, forment des groupes durant toute l'année. Chez les mâles, de petits groupes peuvent se former, notamment chez les jeunes adultes. Ces groupes se dispersent lors de la période de brame correspondant au rut en septembre et octobre. Les vieux mâles ont par contre tendance à rester solitaires. Les capacités de déplacement sont en lien avec la morphologie.

> « Le cerf est parfaitement adapté à la course : garrot saillant, deux paires de pattes d'égale longueur avec une excellente musculature, une encolure large et puissante pour soutenir la ramure. » (Fichant, 2003).
>
> « Il possède des pattes très fines qui lui permettent de courir rapidement (jusqu'à 70 km/h) et de faire d'impressionnants bonds. »[27]
>
> « L'allure ordinaire du cerf qui se déplace est le pas ou le trot léger, l'animal ne galopant que s'il fuit ou poursuit un congénère. […] Le cerf est également capable de nager et fait un excellent sauteur. […] Très joueurs, [les jeunes faons] se poursuivent et semblent s'amuser à sauter des obstacles naturels. »[28]

Ces citations indiquent que le cerf peut courir et bondir, jusqu'à 2,5 m (Sétra, 2008), pour se déplacer et passer ainsi des obstacles. Ces capacités de mouvements peuvent l'entraîner sur des longues distances, de plusieurs kilomètres si nécessaire. Les déplacements des cerfs dépendent

[26] Source : atlas de la biodiversité, Agenda 21 du bassin clusien [http://www.agenda21-cluses.fr/]
[27] Citation du site : [http://www.cheloniophilie.com/]
[28] Citation du Larousse Encyclopédie, en ligne [http://www.larousse.fr/encyclopedie]

en fait de plusieurs facteurs. À l'échelle de la journée, ils sont majoritairement rythmés par l'alimentation : recherche, consommation et rumination. Les déplacements montrent aussi de grandes variabilités au cours de l'année. Ils sont aussi fonction du sexe, de l'âge et de la saison. Nous détaillons ces deux aspects des déplacements, annuels et quotidiens.

- Déplacements annuels :

Les déplacements pendant une année dépendent fortement du cycle biologique des individus et notamment du cycle de reproduction. Ils sont donc distincts entre mâles et femelles.
La chute des bois chez les mâles a lieu entre mars et mai. Les nouveaux bois poussent jusqu'en août. Pendant toute cette période, le cerf se déplace peu et se cantonne à des zones limitées souvent riches en nourriture car la reconstitution des bois demande un apport d'énergie. Au début du mois de septembre, des mouvements de dispersion ont lieu pour rejoindre des sites de rut, puis en octobre pour retourner sur les domaines vitaux d'origine. Les distances parcourues atteignent jusqu'à une dizaine de kilomètres pour le trajet aller, comme observé à partir de la RNCFS de La Petite Pierre (Klein & Hamann, 1999). Les mâles se déplacent peu pendant la période de brame et s'alimentent moins (Bouquier, 2003). Le reste de l'année, les cerfs ont des déplacements erratiques lorsqu'ils sont jeunes, et des déplacements à l'intérieur de domaines vitaux stables en vieillissant. Certains mâles marqués à La Petite Pierre ont parcouru jusqu'à 60 km lors de déplacements d'émigration pour trouver un nouveau domaine de vie (Hamann *et al.*, 2003).
Les femelles ont des domaines vitaux plus stables et se déplacent moins que les mâles. Sur la réserve de La Petite Pierre dans Hamann *et al.* (2003), elles occupent des domaines autour de 1000 ha, soit en moyenne moitié moins que les mâles, même si de fortes variabilités peuvent être observées. Cependant le cœur de ce domaine, c'est-à-dire les zones les plus utilisées, ne représente que 15 % du domaine total soit environ 150 ha, le reste étant exploité temporairement lors de menaces par exemple. Les superficies parcourues peuvent également varier selon les saisons et donc selon les ressources et les naissances des faons. Dans Náhlik *et al.* (2009), ces domaines peuvent doubler en hiver. Le jeune faon est caché dans un endroit refuge pendant une ou deux semaines, puis il suit sa mère dans sa recherche de nourriture.

- Rythme quotidien :

Les activités quotidiennes des cerfs se calent sur des phases d'alimentation, de rumination, de repos, ainsi que de déplacement entre deux zones d'intérêt (Bouquier, 2003). La recherche de nourriture a lieu autour de cinq fois par jour, en particulier à l'aube et au crépuscule qui sont les périodes pendant lesquelles les déplacements observés sont souvent les plus importants (Ager *et al.*, 2003). Les déplacements journaliers peuvent dépendre des conditions météorologiques ainsi que des perturbations humaines. Par exemple l'activité nocturne augmente en cas de températures élevées ou à proximité de zones touristiques (Fichant, 2003).

Relation entre paysage et déplacements

Les relations entre paysage et déplacements des cerfs sont importantes. L'influence du paysage sur les déplacements est notable lors des dispersions ou des marches quotidiennes. La répartition des zones de refuge, d'alimentation, de repos dans le domaine vital, au cœur ou élargi, orientent les déplacements.
Concernant la définition du domaine vital, les éléments cités précédemment sont intéressants pour l'espèce : zones de refuge, points ou cours d'eau, clairières, pâturages. S'ils peuvent sauter certains obstacles lors de leurs déplacements, certains se révèlent être des freins. Le cerf est sensible à la fragmentation de son habitat, par exemple par l'implantation de nouvelles

infrastructures de transports linéaires[29]. La barrière que représente une route ou une voie ferrée provoque d'une part une incapacité de traverser et d'autre part une diminution des domaines de vie. La perte de connectivité entre zones d'habitat propices peut entraîner une restriction des déplacements quotidiens. Les déplacements saisonniers sont également concernés, amenant à terme une réduction des flux de gênes. Cependant, les passages dédiés à la grande faune pour la traversée des infrastructures existent et sont utilisés par les cerfs ainsi que par les chevreuils (Vignon, 2008 ; Vanpeene-Bruhier & Berne, 2005). La Figure II.19 illustre des espaces de libre circulation du cerf. Ces espaces correspondent aux zones entre les massifs forestiers effectivement utilisées par les cerfs pour se déplacer. Ils sont caractérisés selon la présence ou non d'obstacles interrompant la libre circulation des animaux : infrastructures de transport, zones urbanisées, enclos (Mouron *et al.*, 1997).

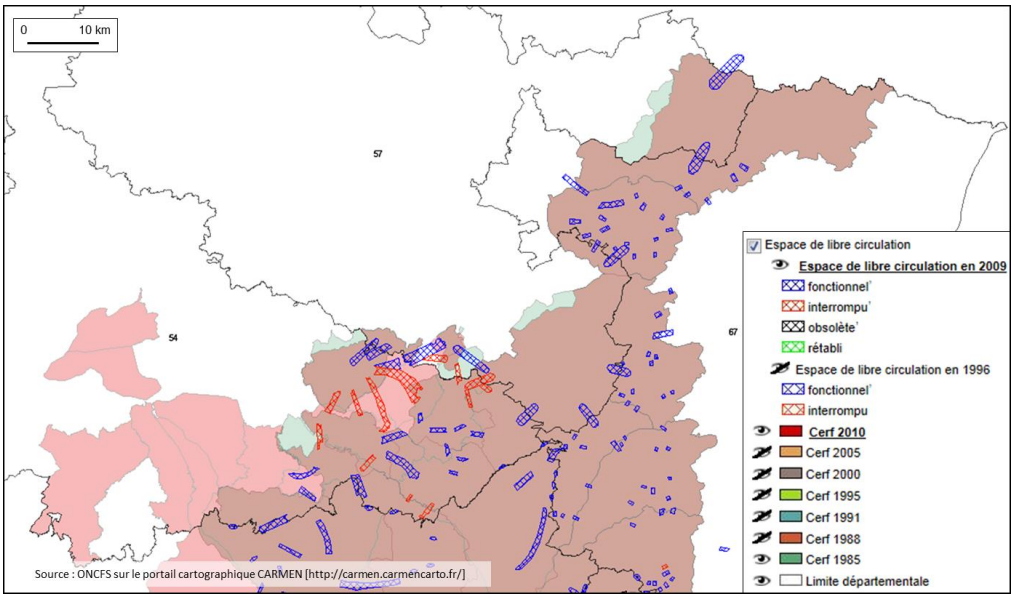


Figure II.19. Cartographie des espaces de libre circulation du cerf élaphe dans le nord des Vosges. Ces espaces sont renseignés sur la présence (espace interrompu) ou non (espace fonctionnel) d'obstacles aux déplacements. Les espaces interrompus le sont depuis au moins dix années. En aplat de couleur : rose pour les lieux de présence de cerf en 2010 et vert pâle pour sa présence en 1985 (superposition des deux dates en rose foncé).

Les cerfs ont tendance à adapter leurs déplacements en fonction des perturbations humaines et à utiliser les caractéristiques de l'espace pour se réfugier (Náhlik *et al.*, 2009). Ils se dirigent en effet dans des zones de refuge où la visibilité est réduite pendant la période des dérangements. Cela peut concerner des activités touristiques. Les effets de la chasse peuvent aussi avoir pour conséquence des déplacements des zones d'activités principales vers des zones de refuge (Klein, 2008). Le danger est pourtant plus élevé lorsque les individus se déplacent car ils sont davantage repérables. La décision est souvent prise par les animaux les plus avertis. Dans les hardes matriarcales, ce sont d'ailleurs les meneuses qui sont en charge de surveiller les dangers potentiels lors de la pâture (Fichant, 2003).

À une échelle locale, les éléments du paysage peuvent influencer les déplacements. Les gestionnaires forestiers mettent en place des configurations dans les parcelles forestières afin de limiter les dégâts du cerf gênant la régénération de certaines essences. Les clôtures peuvent limiter les déplacements. Klein *et al.* (2011) font l'hypothèse que des zones de coupes avec des troncs d'arbres au sol gênent la marche et peuvent ainsi éloigner les animaux.

[29] Source : ONCFS [http://www.oncfs.gouv.fr/]

Lors de déplacements de dispersion, La Morgia *et al.* (2011) notent l'influence sur la présence de cerfs, du relief – les pentes faibles étant plus utilisées – et de la végétation – petite distance aux zones boisées. Les variables de l'environnement sont cependant souvent corrélées et c'est leur combinaison qui en fait des zones favorables à la dispersion (Patthey, 2003). Par exemple, les fonds de vallées correspondent à des altitudes basses et à des pentes faibles, et ils sont souvent associés avec des cours d'eau qui représentent des zones de corridor. Dans le contexte des déplacements dans un espace connu, les individus se déplacent en harde, notamment les biches, en suivant des tracés identiques nommés coulées. Bouquier (2003) indique dans son étude que ces lieux de passage sont généralement rectilignes et qu'ils longent les pentes de biais.

Les déplacements des renards, chevreuils et cerfs sont comme pour beaucoup d'espèces, des déplacements de dispersions et des déplacements dans le cadre d'un rythme journalier. La compréhension de ces deux types de déplacements, sur de longues distances ou sur un espace restreint, fait appel à une connaissance de l'environnement des animaux. Les espèces répondent a priori différemment aux éléments du paysage. Elles présentent des appréhensions variées selon leur cycle biologique et la composition de l'espace dans lequel elles évoluent. La recherche de l'influence du paysage concerne tous les types de déplacements.

3) LES DONNÉES UTILISÉES ET LES ÉTAPES DE LA DÉMARCHE MÉTHODOLOGIQUE

Nous présentons dans cette partie les jeux de données utilisés pour analyser les comportements spatiaux des espèces animales : les localisations des animaux et les données de description de l'espace. Les échantillons de localisations des animaux sont présentés en Annexe 2.

3.1. Les données de déplacements d'animaux

Les six cas d'étude correspondent à deux techniques différentes d'enregistrement des déplacements d'animaux. Les renards ont été suivis par l'ELIZ à Annemasse et à Pontarlier grâce à un système VHF (*Very High Frequency*). Les autres études ont été menées à l'aide de colliers GPS programmés selon des fréquences d'acquisition. D'un point de vue général, les localisations obtenues par VHF ont une fréquence temporelle moins grande, ce qui privilégie la connaissance des espaces de vie, comme indiqué dans le chapitre I. Les données GPS décrivent des déplacements avec une fréquence temporelle élevée, de cinq minutes d'intervalle entre deux localisations. Les localisations par VHF sont renseignées en planimétrie par un couple de coordonnées (x, y). Celles par GPS le sont en planimétrie et en altimétrie par des coordonnées (x, y, z), avec une coordonnée en z de moins grande précision que les coordonnées en x et en y.

Spécifications générales des données

Les données sont des échantillons de bases de données plus larges. Dans la plupart des cas, il s'agit d'un extrait pendant quelques jours et concernant quelques animaux. Le contexte des études a été décrit dans la partie II-2.1 et nous nous attachons à présent aux données utilisées. Les spécifications des localisations enregistrées sont détaillées dans le Tableau II.3. Les distinctions importantes entre les cas d'étude correspondent à :

- la méthode de suivi ;
- le nombre de localisations comprises dans l'échantillon de données ;
- le nombre de jours concernés par les localisations, en moyenne par individu ;
- la fréquence moyenne, c'est-à-dire la moyenne sur tous les individus des intervalles de temps moyens entre deux localisations ;
- la durée totale du cas d'étude, égale ou plus courte que l'étude complète ;
- la date des données : l'année ou les années des suivis en englobant tous les animaux par cas d'étude.

Les volumes des données sont différents selon les sites d'étude. Le site d'Aurignac correspond au plus grand échantillon, ce qui permet de visualiser la variabilité des comportements individuels selon les caractéristiques des individus, et dans la durée. Les autres sites correspondent à des suivis sur peu d'individus et sur des courtes durées, ou alors à de grands intervalles de temps entre les localisations. Les échantillons de données sont adaptés à l'analyse des déplacements individuels, qui peut aboutir à des conclusions généralisables à l'espèce. Les analyses ont donc été menées cas par cas. Les comparaisons ont été principalement effectuées entre les individus sur un même site et dont les localisations ont des spécifications similaires.

Tableau II.3. Tableau récapitulatif des spécifications des données par cas d'étude.

source	*espèce*	*site d'étude et n° de département*	*nombre d'individus*	*méthode de suivi*	*nombre de relevés*	*nombre de jours moyen concernant des relevés d'un individu*	*fréquence moyenne de relevés*	*moyenne de la durée de suivi d'un individu*	*dates*
ELIZ	renard	Annemasse (74)	8	VHF	581	21	21 h	278 jours	2003 à 2005
ELIZ	renard	Pontarlier (25)	4	VHF	173	16,5	25 h	215 jours	2004 à 2006
Anses	renard	Nancy (54)	4	GPS	675	1,5	15 min	5,5 jours	2006
ONCFS	chevreuil	La Petite Pierre (67)	3	GPS	4000	5,5	5 min	206 jours	2008
ONCFS	cerf	La Petite Pierre (67)	3	GPS	2541	4	5 min et 15 min	164 jours	2008
INRA	chevreuil	Aurignac (32)	70	GPS	318082	297	10 min, 1 h ou 6 h	297 jours	2007 à 2010

Pour les localisations de chevreuils dans le canton d'Aurignac, les fréquences d'acquisition varient entre 10 minutes, 1 heure et 6 heures. Le calcul de la fréquence moyenne est donc peu pertinent. Pour les données sur les chevreuils et les cerfs dans la réserve de La Petite Pierre, les fréquences sont régulières, toutes les 5 minutes ou toutes les 15 minutes. Les localisations de renards ont des fréquences diverses au cours de la journée, les moyennes variant entre 15 minutes et 21 heures. La moyenne des intervalles de temps entre deux localisations peut cacher des disparités importantes. Par exemple pour un animal, la fréquence des relevés peut être de 5 minutes pendant une heure par jour puis de 15 minutes le reste du temps. La Figure II.20 montre deux extraits de relevés avec des intervalles de temps différents en moyenne entre deux cas d'étude et à l'intérieur du même cas d'étude.

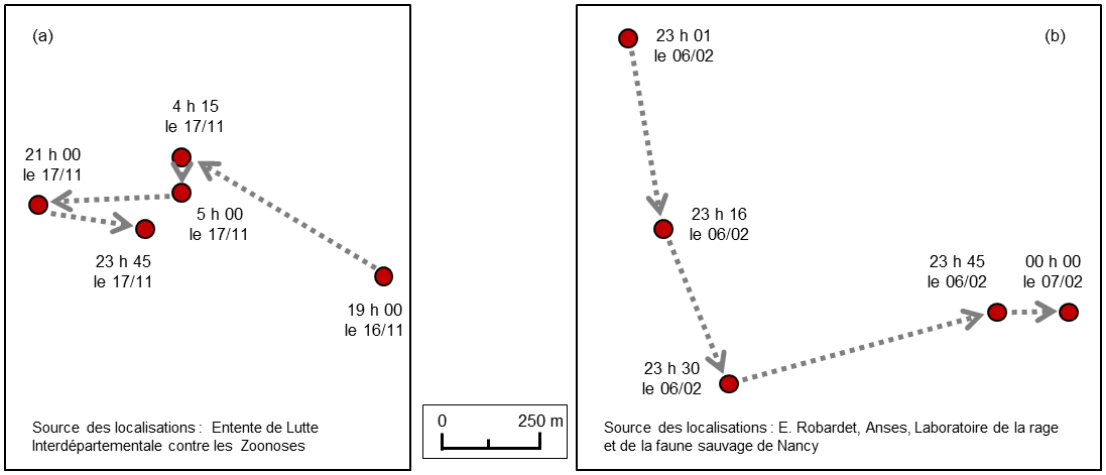


Figure II.20. Extrait de données de déplacements : localisations enregistrées successivement par VHF (a) et GPS (b). Les dates (heure et jour) peuvent avoir des intervalles de temps irréguliers, entre 45 minutes et 16 heures dans l'image (a), et toutes les 15 minutes dans l'image (b).

Les localisations obtenues par télémétrie ont des précisions variables selon la technique et selon le contexte environnemental, comme expliqué dans le chapitre I-2. Dans les données utilisées, la précision temporelle du GPS est à la seconde près. Les données VHF sont datées à la minute. La

précision spatiale est estimée en moyenne comme suit, d'après la littérature et les écologues ayant acquis ce type de données :

- les localisations par VHF : environ 50 mètres en planimétrie d'après la littérature, pas d'altimétrie ;
- pour les données GPS : 20 mètres en planimétrie. L'altimétrie est considérée comme peu précise. Les données acquises sur les chevreuils à Aurignac ont été traitées par correction différentielle à l'aide de stations de base au sol, ce qui permet de respecter la précision planimétrique pour les enregistrements sans problème de réception du signal satellite. Pour le cas d'étude sur les renards à Nancy, l'estimation de la précision est autour de 30 mètres après la suppression des localisations avec des valeurs de PDOP (*Positional Dilution of Precision*) supérieures à 10 (Robardet, 2007).

Ces jeux de données contiennent des localisations aberrantes, c'est-à-dire avec des coordonnées au temps t anormalement éloignées de la position de l'animal au temps t-1 de l'enregistrement. Selon les modes d'extraction des échantillons de données, ce problème se pose différemment. En effet, dans certains échantillons, la localisation est notée comme nulle ou non existante lorsque le relevé a échoué. En plus des programmations de données différentes selon les périodes de la journée ou de l'année, des échecs d'enregistrement peuvent modifier la régularité des données. La fréquence des données est calculée en prenant en compte l'ensemble des enregistrements, réussis ou non. Les données de localisations des cas d'étude ont été fournies sous une forme plus ou moins modifiée par rapport aux données brutes. La Figure II.21 représente les intervalles de temps entre les enregistrements. Ces intervalles sont à prendre en compte afin de sélectionner les données pour des calculs de moyennes pertinents.

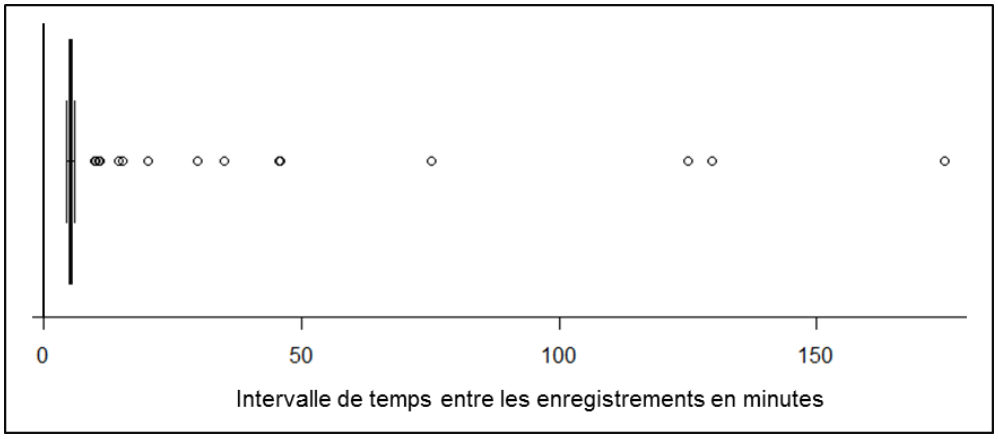


Figure II.21. Diagramme en boîte des intervalles de temps entre les localisations enregistrées pour un renard pendant une journée (source : Anses). Les intervalles varient entre 5 minutes (pour 80 % des intervalles) et 3 heures, ce qu'il faut gérer lors des calculs de moyennes.

La chronologie selon laquelle nous avons établi des collaborations a orienté l'approche méthodologique pour l'analyse des données, outre la taille et l'exhaustivité des échantillons variables selon les cas d'étude. Nous avons d'abord obtenu les données sur les renards avec l'ELIZ et l'Anses, puis peu après celles concernant les cervidés dans les Vosges avec l'ONCFS. Ces échantillons concernent un nombre restreint d'individus, entre 3 et 8 par cas d'étude. Notre approche s'est donc concentrée sur la caractérisation des comportements individuels de déplacement. L'exploitation des différences entre les individus (sexe, âge) et entre les périodes de temps (selon la saison) est par contre limitée. L'échantillon sur les chevreuils dans le canton d'Aurignac concerne un nombre beaucoup plus élevé d'individus et sur des périodes de temps annuelles. La collaboration avec l'INRA a été établie plus tardivement, les données ont été mises à disposition en fin de 2ème année de thèse. Ce calendrier nous a amenée à réitérer l'approche

méthodologique définie à partir des premiers échantillons. Nous reviendrons au chapitre III sur l'adéquation des analyses de données aux échantillons disponibles selon les caractéristiques de ces échantillons.

Matériels et méthodes des suivis

Dans les deux techniques de suivi, VHF et GPS, la pose d'un collier est nécessaire et par conséquent la capture et la manipulation des animaux. Nous listons ci-dessous le matériel et les types de colliers utilisés, ainsi que les méthodes de capture employées. Afin de poser un collier émetteur ou un collier GPS sur un renard, il est nécessaire de repérer des indices de présence sur le site d'étude. Il est en particulier intéressant de noter les lieux de passage, appelés coulées, et les endroits fréquentés. Cette démarche s'accompagne généralement d'une enquête de voisinage, d'autant plus pertinente dans le cas des renards qu'ils peuvent s'approcher régulièrement des habitations. De même, les populations de cervidés font l'objet de recensements et les endroits fréquentés sont repérés avant la pose de pièges de capture (Chevrier *et al.*, 2009).

Dans le cas des renards suivis à Annemasse et à Pontarlier, les captures ont été effectuées à l'aide de cages-pièges avec appâts et de collets à arrêtoir. Les protocoles de capture et de suivi sont détaillés dans Sigaud (2003) et Raton (2004). Les colliers émetteurs sont de la marque ATS®, Advanced Telemetry Systems, modèle M2220. Un collier pèse environ 160 grammes. Deux antennes ont été utilisées pour capter les signaux des colliers, de la marque Televilt®, modèle O-5/8M et modèle Y-4FL. Le boitier récepteur qui contient également une antenne mais de plus faible portée, est un modèle RX-98 de la marque Televilt®. Il permet de régler la fréquence recherchée.
Les renards étudiés à Nancy lors de la thèse de Robardet (2007) ont été équipés par des colliers GPS Lotek®, modèle 3300SL, après capture par les mêmes méthodes que précédemment, en plus de l'utilisation de pièges à lacet de pattes (voir les méthodes de capture en Annexe 3). Le poids initial d'un collier est de 200 grammes. Il est également associé à un système de repérage VHF. Le renard, de par sa faible masse, est une espèce qui contraint davantage le poids du collier et de la batterie que les cervidés. Le poids minimal des colliers GPS existants est situé autour de 200 grammes avec, par exemple, pour le modèle Lotek®, une capacité maximale de 12 jours d'autonomie et 1200 enregistrements.

Pour les cas d'étude issus de l'ONCFS et de l'INRA, les animaux ont été capturés lors d'une battue dirigée vers des filets tombants (voir en Annexe 3). Les colliers posés sur les chevreuils et les cerfs de la réserve de La Petite Pierre ainsi que sur les chevreuils dans le canton d'Aurignac, sont de la marque Lotek® (Gottardi, 2011). Selon les modèles, leur poids varie entre 200 et 900 grammes. Nous avons assisté à une journée de capture de chevreuils menée par l'INRA, ce qui nous a permis de nous rendre compte du déploiement logistique nécessaire afin de capturer les animaux et de poser des colliers dans de bonnes conditions (cf. Figure II.22). Les colliers sont par la suite récupérés de plusieurs manières. Certains colliers GPS sont associés à un « drop-off » qui est un système les détachant à une date prévue. Pour les autres colliers GPS et les colliers récepteurs, la mise en place de nouvelles captures est nécessaire. La récupération du matériel peut aussi se faire suite à la mort de l'individu suivi.

Figure II.22. Chevreuil sur le site d'étude d'Aurignac après la pose d'un collier GPS par le CEFS de l'INRA.

Les enregistrements peuvent concerner plusieurs variables selon les techniques et les colliers. Pour les colliers VHF, seules les localisations sont calculées par triangulation. Les autres informations sur l'état ou l'activité des animaux sont issues d'observations visuelles. Les systèmes GPS mis en place dans les cas d'étude ont permis de récolter des informations complémentaires aux coordonnées spatio-temporelles. Pour chaque enregistrement, le nombre de satellites captés est indiqué et leur configuration est estimée à partir du PDOP et du DOP (*Dilution of Precision*).

Contexte spatio-temporel des localisations

La capture doit être réalisée de la manière la moins traumatisante possible pour les animaux, en observant des précautions de sécurité pour éviter que l'animal ne se blesse ou ne blesse les personnes. Cependant cette action ponctuelle peut se traduire sur le comportement de l'animal. Morellet *et al.* (2009) ont étudié les effets de la capture et de la pose de collier sur des chevreuils. Ils ont constaté que les individus relâchés montraient une préférence plus marquée pendant les dix premiers jours pour des zones de refuge : couvert végétal important, éloignement par rapport aux sources de perturbations anthropiques. Cattet *et al.* (2008) vérifient ce comportement pour d'autres animaux : les déplacements comparés de deux espèces d'ours sont moins importants pendant le premier mois suivant la capture. L'occupation de l'espace et les déplacements sont donc à interpréter dans ce contexte après la capture. Seules les données sur les chevreuils à Aurignac sont concernées car elles couvrent les déplacements du moment de la pose du collier GPS à celui de son retrait.
Les suivis par colliers GPS ne nécessitent pas une présence sur le terrain lors des enregistrements. Les études s'étendent souvent sur des durées plus longues et des fréquences plus élevées, dans la limite des capacités des batteries, que les suivis par observations sur le terrain ou par VHF. Les positions calculées à partir des signaux VHF sont soumises à des repérages en temps réel et à une proximité relative des animaux. Il s'agit de trouver un compromis entre une distance collier émetteur-récepteur faible pour une bonne précision de la direction du signal, et un éloignement suffisant de l'observateur afin d'éviter de perturber l'animal et qu'il ne modifie son comportement. Guitton (2001) établit qu'une distance inférieure à 300 m entre l'observateur et le renard correspond à une précision des mesures entre 50 et 100 m. Les déplacements rapides sont alors difficiles à déterminer, ce qui n'est pas le cas avec les colliers GPS programmés. Les suivis par GPS sont intéressants pour détecter des mouvements à l'échelle du paysage et de la sélection de ressources (Thirgood *et al.*, 2007). Le compromis entre fréquence temporelle et durée de l'étude doit cependant être trouvé. La question du nombre d'individus suivis par GPS est liée à la représentativité de l'échantillon par rapport à une population, ainsi qu'aux coûts des colliers GPS, de leur utilisation, des captures et des suivis des animaux sur le terrain.

Outre les conséquences potentielles de la capture, les déplacements sont à interpréter dans le contexte temporel lié à l'enregistrement. Les espèces étudiées ont un cycle biologique annuel et un rythme quotidien de déplacements. La date des relevés doit donc être prise en compte pour comprendre les positions des animaux par rapport aux éléments du paysage et l'enchaînement temporel des positions. Pour les types de déplacements, les cas d'étude couvrent des rythmes quotidiens. Les données sur les chevreuils dans le canton d'Aurignac concernent pour la plupart des individus une période d'un peu moins d'une année. Cette couverture temporelle offre la possibilité de visualiser des déplacements de dispersion, pour les jeunes à la recherche d'un nouveau domaine vital, et pour les adultes lors de la période de reproduction. Quant à l'interprétation écologique et éthologique des données de localisations, l'expertise des écologues est importante. Elle intervient également à propos des avantages et des limites techniques des positionnements acquis par VHF et GPS des animaux (cf. chapitre I-2.1.3). La précision des données dépend aussi du contexte environnemental. Les taux d'enregistrements valides par GPS dépendent du paysage, comme par exemple dans Brendel *et al.* (2012) où le taux de succès est meilleur en milieu agricole que forestier. La RNCFS de La Petite Pierre est un milieu forestier relativement homogène mais la couverture forestière est moindre autour des voies d'accès et dans les clairières. Le relief peut également influencer la précision des localisations. Les autres sites d'étude sont composés d'une mosaïque de types d'occupation du sol, en particulier des surfaces boisées, des cultures, des prairies et des zones bâties. Les données des cas d'étude peuvent être plus ou moins exhaustives en fonction de l'environnement spatial, indépendamment de la programmation des relevés.
Les données de déplacements de nos cas d'étude portent donc sur des fréquences temporelles, des durées et des précisions différentes. Les analyses des relations entre paysage et déplacements doivent prendre en compte le contexte technique et écologique des enregistrements.

3.2. Description des données géographiques

L'environnement spatial est composé de différents éléments : végétation, hydrographie, relief, bâti. L'influence de l'espace sur les déplacements d'animaux est analysée à partir de données existantes. La connaissance de l'utilisation de l'espace par les animaux est fonction de la précision et de l'exhaustivité de ces deux séries de données décrivant l'espace et les déplacements des animaux. Nous nous intéressons dans cette thèse aux données décrivant l'espace à grande échelle, c'est-à-dire avec un niveau de détail élevé, de précision au moins métrique. Nous nous attachons en particulier à la BD TOPO® produite par l'IGN. Cette base de données contient la représentation numérique de composantes de l'espace réel. Elle est saisie selon des spécifications présentées ci-dessous.

Spécifications des données de la BD TOPO®

La BD TOPO® fait partie du RGE®, Référentiel à Grande Échelle. Elle décrit l'information topographique au sens large, c'est-à-dire la forme du terrain ainsi que les éléments constituant l'espace comme les bâtiments ou les cours d'eau. Elle comprend des objets numériques en format vecteur. Ces objets sont organisés en thèmes réunissant chacun plusieurs classes. Les thèmes sont les suivants dont la description est donnée d'après IGN (2008).

- Les voies de communication routière : une information attributaire distingue les types de routes : autoroute, bretelle, route à 2 chaussées, route à 1 chaussée, route empierrée. Les autres voies de circulation incluses dans ce thème sont les chemins, les sentiers et les pistes

cyclables. L'importance des voies d'accès correspond au type de liaisons routières et est donc liée à l'intensité du trafic :
- importance 1 (nous la désignons par une importance très grande) : « liaisons entre métropoles » d'après les spécifications ;
- importance 2 (grande importance) : « liaisons entre départements » ;
- importance 3 (importance moyenne) : « liaisons ville à ville à l'intérieur d'un département » ;
- importance 4 (importance faible) : « voies permettant de se déplacer rapidement à l'intérieur d'une commune » ;
- importance 5 (importance très faible) : « voies permettant de desservir l'intérieur d'une commune » ;
- importance non renseignée (route sans trafic motorisé) : « non concerné par cet attribut ».

- Le réseau ferroviaire : les lignes de chemin de fer, les aires de triage et les bâtiments des gares.
- Les réseaux de transport d'énergie : les conduites de matières premières et les installations électriques dont les lignes, les postes de transformations et les pylônes.
- Les bâtiments : ce thème concerne plusieurs types de constructions comme les habitations, les bâtiments publics, administratifs ou industriels, les monuments ainsi que les cimetières, les terrains de sport, les pistes d'aérodromes, les réservoirs d'eau, les ouvrages d'art tels que les ponts, les écluses, les barrages.
- Les surfaces d'activités et des localisations ponctuelles de constructions ou de sites d'activités. Cela concerne par exemple les hôpitaux, les parcs de loisirs, les musées.
- L'hydrographie comprend les étendues et les cours d'eau, naturels ou artificiels. Les retenues d'eau et les canalisations sont aussi saisies.
- L'orographie de détail : les talus, les murs de soutènement, les carrières et les levées de terre.
- La végétation. Seules sont spécifiées les surfaces arborées ou arbustives. Selon les spécifications, la sélection s'effectue ainsi :

  « Bois de plus de 500 m² ; forêts ouvertes, landes, vignes et vergers de plus de 5000 m². L'exhaustivité ne pouvant être assurée en dessous de ces seuils, les sélections sont effectuées de façon à donner une vision représentative du paysage :
  - structure principale d'un réseau dense de haies ou rangées d'arbres ;
  - sélection d'arbres isolés et bosquets en zone urbaine et en zone de végétation clairsemée (maquis, jardins ouvriers…). »

Dans certains départements, la classe sur la végétation a été enrichie avec des informations sur la composition des peuplements. Cet enrichissement s'est effectué par appariement entre la couche de végétation saisie par l'IGN et la carte forestière de l'IFN (Guinaudeau, 2006). Cette nouvelle classe de végétation multithème est créée par département. L'attribut sur la composition est renseigné en France métropolitaine selon les valeurs suivantes : [Forêt fermée de feuillus ; Forêt fermée de conifères ; Forêt fermée mixte ; Forêt ouverte ; Peupleraie ; Bois ; Haie ; Verger ; Vigne ; Lande]. Les haies saisies correspondent aux alignements de végétation de moins de 25 m de largeur et de plus de 100 m de long. Leur espacement minimal est arrêté à 50 m. En 2012, 41 départements étaient couverts par cet enrichissement attributaire et archivés. Parmi les départements d'étude, seul le Bas-Rhin dans lequel se situe la RNCFS de La Petite Pierre est concerné.

La liste des thèmes n'est pas exhaustive car d'autres classes existent comme les toponymes et les limites administratives. Ces entités sont cependant immatérielles et ne se traduisent pas directement par des éléments concrets. Elles n'interviennent pas dans l'analyse de l'influence du paysage sur les déplacements de la faune, même si l'organisation administrative du territoire a une influence sur les décisions d'aménagement. Selon les classes, le nombre d'attributs diffère. Le Tableau II.4 correspond à des extraits de deux classes : les routes et les zones arborées d'un

même jeu de données. Les types d'information attributaire varient d'une classe à l'autre. Pour l'ensemble des classes, les seuls attributs communs sont l'identifiant unique des objets et la précision des coordonnées planimétriques.

Tableau II.4. Extrait des informations attributaires de la BD TOPO®. En haut, la table ROUTE : 11 attributs sur les 32 au total sont présentés. En bas : la table ZONE ARBORÉE contenant 3 attributs.

IDENTIFIANT	PRECISION PLANIMETRIQUE (m.)	PRECISION ALTIMETRIQUE (m.)	NATURE	NUMERO	IMPORTANCE	CLASSE ADMINISTRATIVE	FRANCHISSEMENT	LARGEUR	NOMBRE DE VOIES	SENS
TRONROUT[…]19	1,5	1	Route à 2 chaussées	D674	2	Departementale	Pont	9	2	Inverse
TRONROUT[…]63	1,5	1	Autoroute	A330	2	Autoroute	NC	10	2	Direct
TRONROUT[…]25	2,5	2,5	Chemin	NC	5	Autre	NC	0	0	Double

IDENTIFIANT	PRECISION PLANIMETRIQUE (m.)	NATURE
ZONEARBO0000000088815005	5	Zone arborée
ZONEARBO0000000088814973	5	Zone arborée

Les spécifications des bases de données du RGE® sont détaillées dans le document IGN (2008) sur les métadonnées. Ces bases dont la BD TOPO® proviennent d'une base de production unique. Les différentes bases de données et produits cartographiques sont extraits à partir de cette base commune. Celle-ci est mise à jour en continu et la majorité des données décrivent une réalité sur le terrain datant de moins d'un an. Les données de végétation peuvent cependant présenter un décalage allant jusqu'à dix ans avec la réalité. Certains thèmes géographiques doivent répondre à un critère d'exhaustivité. Ce critère correspond à un seuil minimal de correspondance entre la réalité et la base, en prenant en compte les manques ou les surplus dans les données. Les seuils arrêtés sont les suivants :

- 98 % du réseau routier revêtu ;
- 99 % des lignes ferroviaires à grande vitesse et des lignes principales ;
- 96 % du réseau électrique à haute et très haute tension ;
- 99 % de l'hydrographie permanente ;
- 95 % du bâti indifférencié et 98 % pour les autres bâtiments. Les bâtiments sont mis à jour en correspondance avec les plans cadastraux de la Direction Générale des Impôts. Le décalage peut aller jusqu'à trois ans, les zones densément urbanisées étant actualisées annuellement ;
- 99 % des pistes d'aérodrome.

Ces valeurs de pourcentage sont ensuite validées par des vérifications sur le terrain. Pour la végétation, aucun taux d'exhaustivité n'est défini. La saisie est normalement exhaustive lorsque le critère de surface minimale énoncé précédemment est vérifié (plus de 500 m² ou de 5000 m² selon le type de couvert végétal).

Les choix de modélisation des objets dépendent de leur forme et de l'emprise qu'ils ont sur le terrain. Ils dépendent également de la précision souhaitée dans la description de l'espace. Par

exemple, la BD TOPO® est une base à plus grande échelle que la base de données BD CARTO®, donc plus précise géométriquement. La BD CARTO® contient néanmoins des informations attributaires supplémentaires comme la largeur des cours d'eau. La Figure II.23 illustre les différences de modélisation – linéaire et surfacique – entre les deux bases pour une même réalité terrain : un cours d'eau. Alors que les données de déplacements sont des localisations et donc des points, les données de description de l'espace peuvent avoir des géométries ponctuelles, linéaires ou surfaciques. Les objets sont donc décrits par une succession de coordonnées. Les coordonnées peuvent être un couple (x, y) si la saisie est uniquement planimétrique. Certains objets sont en 3D et leur géométrie est constituée d'une suite de (x, y, z). Les objets saisis peuvent avoir des précisions différentes selon le mode de saisie : par GPS, par photogrammétrie ou à partir d'une source cartographique. Plusieurs classes de précision sont ainsi définies entre 50 centimètres et 30 mètres. La précision géométrique de la BD TOPO® est globalement considérée comme métrique en planimétrie, soit de l'ordre du mètre. La précision en altimétrie, donc de la coordonnée z de chaque point relevé, varie entre 1 et 20 m. La justesse des valeurs attributaires dépend de la nature des objets. Par exemple la qualification des natures de routes doit respecter moins de 4 % d'erreur. Les confusions entre les différentes classes, sans prendre en compte les attributs, doivent être inférieures à 1 %.

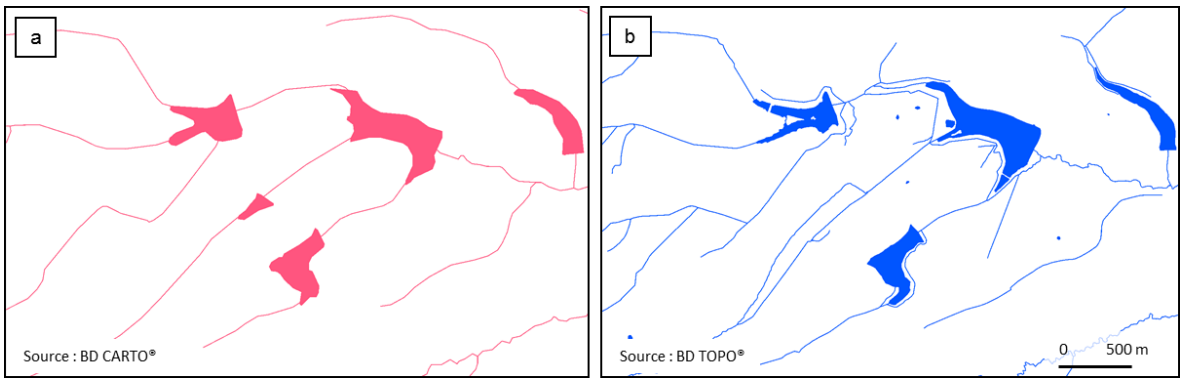


Figure II.23. Différence de précision géométrique dans les modélisations linéaire et surfacique de l'hydrographie entre deux bases : a) la BD CARTO®, et b) la BD TOPO® à plus grande échelle spatiale.

Pour l'analyse des relations entre les éléments du paysage et les déplacements de la faune, la BD TOPO® contient des informations précises sur la description de l'espace. Certaines classes sont susceptibles de représenter des obstacles ou des éléments favorables aux déplacements. D'autres classes paraissent par contre moins pertinentes pour la compréhension des déplacements. La BD TOPO® est une base de référence à grande échelle. Nous l'avons principalement utilisée pour décrire l'espace. D'autres sources de données peuvent être intéressantes. Nous présentons celles que nous avons intégrées dans nos analyses.

Spécifications des données du RGE®ALTI

La forme du terrain est un élément important du paysage. Elle influence la présence d'animaux ainsi que leurs déplacements. La base de données RGE®ALTI décrit l'information se référant au relief par un modèle numérique de terrain (MNT). Le MNT est renseigné par les altitudes. Il est caractérisé par deux paramètres : sa résolution planimétrique et sa précision altimétrique. Le RGE®ALTI fournit un MNT découpé en carrés planimétriques de 25 m sur 25 m, soit une résolution spatiale de 25 m comme sur l'exemple de la Figure II.24. Une seule valeur d'altitude est associée à chacune des cellules. L'information d'altitude est continue, c'est-à-dire que tout point de l'espace a une valeur d'altitude. Les classes d'altitude sont définies à chaque mètre.

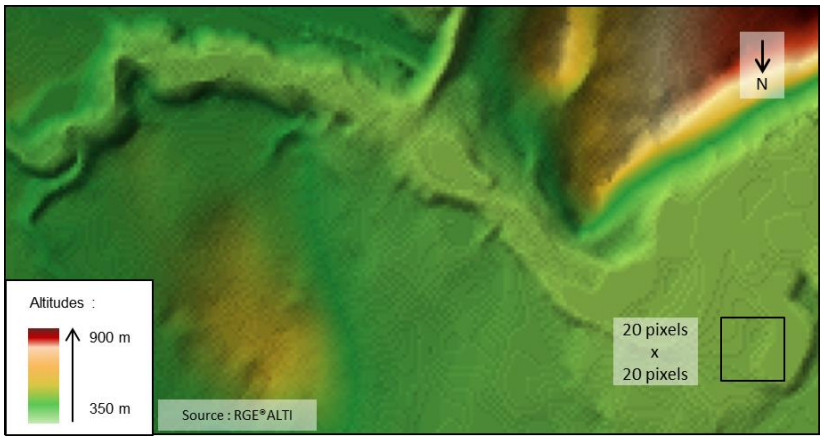


Figure II.24. Extrait du MNT sur le site d'Annemasse. Le lit de la rivière de l'Arve est reconnaissable ainsi que les collines alentours. Un pixel représente un carré de 25 m sur 25 m, soit une surface de 625 m². Les valeurs d'altitude sont définies par classes de 1 m, ici entre 372 et 895 m, du vert clair au marron foncé. Nous avons placé le nord vers le bas de la figure afin de mieux visualiser le relief.

La construction du MNT est réalisée par interpolation d'une base de données altimétriques contenant des points côtés et des lignes de niveau. Le MNT est géoréférencé, il est superposable aux données de localisations et aux données de la BD TOPO®. Nous avons ainsi, au préalable des analyses de données, comparé les valeurs z des localisations du GPS avec les valeurs du MNT. La Figure II.25 montre la variation dans le temps des valeurs d'altitude GPS et du MNT de l'espace parcouru, pour un renard en zone plane et pour un chevreuil en zone vallonnée. Nous constatons tout d'abord que les différences entre les altitudes du GPS et du MNT ne sont pas les mêmes à chaque localisation. Certaines valeurs en z du GPS sont erronées, par exemple celle à 2 h 15 pour le renard suivi (Figure II.25.a) alors que les coordonnées planimétriques sont a priori valides.

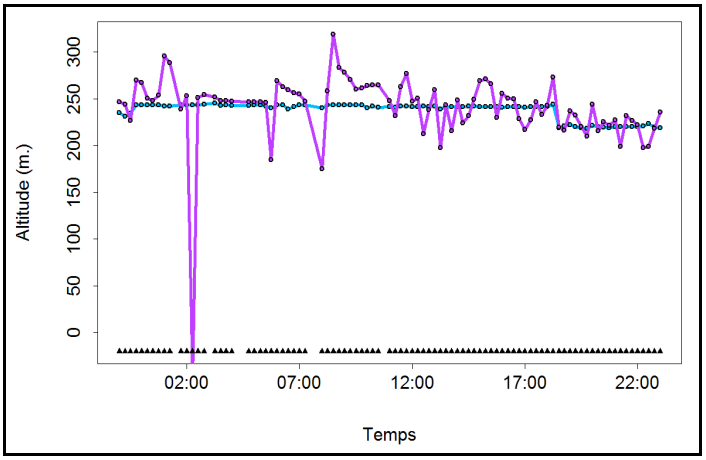


Figure II.25. a) Comparaisons entre les valeurs d'altitude du MNT correspondant aux coordonnées planimétriques des localisations (en bleu) et les valeurs d'altitude calculées par le GPS (en violet), en fonction du temps. Les petits triangles en bas du graphique indiquent les relevés effectués. Exemple de localisations enregistrées pendant 24 heures pour un renard en zone périurbaine relativement plane à Villers-lès-Nancy.

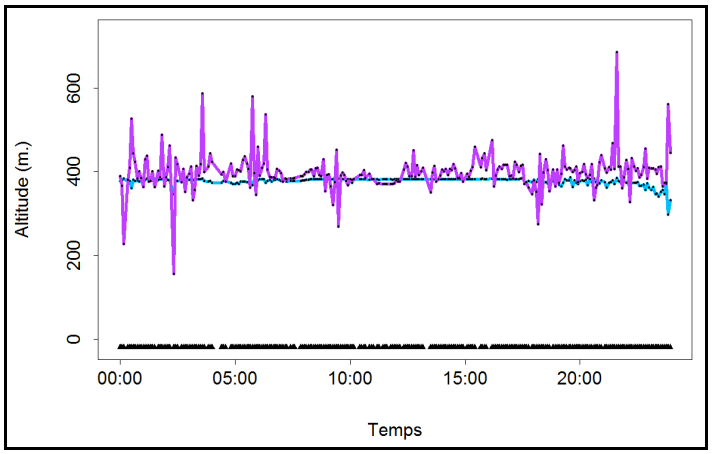


Figure II.25. b) Exemple de localisations enregistrées pendant 24 heures pour un chevreuil en zone forestière vallonnée dans le RNCFS de La Petite Pierre.

Les valeurs d'altitude du MNT sont normalement plus précises que celles données par les colliers GPS et donc plus proches de la valeur réelle d'altitude, même si la précision planimétrique est moins grande pour le MNT. Cela est dû aux masques possibles de l'environnement spatial, aux déplacements des animaux et à l'écart existant entre le sol et le collier installé au cou des animaux qui bougent en fonction des activités.

Les sources de données complémentaires

Les données présentées précédemment ont un niveau de précision géométrique élevé. La couverture du territoire français par le RGE®ALTI est continue. Les objets de la BD TOPO® ne sont pas tous soumis à des taux minimaux d'exhaustivité. Tous les éléments du monde réel ne sont par ailleurs pas concernés par les spécifications de saisie. D'autres sources apportent des informations complémentaires sur la description des éléments du paysage, par exemple sur la végétation non arborée comme les prairies et les champs cultivés. Les données peuvent aussi répondre à une résolution spatiale moins grande. Ces différences de résolution nous amènent à prendre en compte l'analyse du paysage à des échelles spatiales différentes. Les sources de données géographiques utilisées dans la thèse sont listées ci-dessous. D'autres données sont citées dans le mémoire, pour des aspects précis de réalisation ou lors des discussions. Dans ce cas, nous précisons la source et la description de cette donnée au moment de sa citation.

- Les sources d'images

- La BD ORTHO® est une composante du RGE®. Elle comprend des images issues de prises de vues aériennes par caméra numérique (IGN, 2004). Elle couvre l'ensemble du territoire. Selon les zones, sa résolution spatiale est comprise entre 20 et 50 m. Les images livrées ont été corrigées. L'opération d'orthorectification permet de rendre l'image superposable à une carte en corrigeant les effets dus au relief et aux angles de prise de vues. Des corrections radiométriques sont appliquées afin d'uniformiser les couleurs et le rendu visuel des images.

- Les images satellitaires sont disponibles à partir de plusieurs dispositifs. Les satellites du programme Landsat 7 ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper*), fournissent par exemple des images de 15 m de résolution qui sont disponibles en ligne sur le site du gouvernement américain[30]. Leurs capteurs possèdent plusieurs bandes spectrales, dont deux dans le proche et moyen infrarouge, ce qui permet une meilleure reconnaissance des types de végétation.

[30] Site [http://earthexplorer.usgs.gov/]

Un avantage des images aériennes et satellitaires est leur prise de vues sans sélection des éléments au sol, même si la résolution et les phénomènes de masque peuvent cacher des informations. La visibilité des éléments du paysage dépend de la date de prise de vues et leur reconnaissance n'est pas forcément triviale. Il n'est pas évident que les dates de prises de vues exploitables (par exemple sans nébulosité) correspondent à la période de l'année optimale pour la connaissance de l'occupation du sol. La végétation notamment évolue selon des cycles annuels et les essences n'ont pas la même réponse spectrale selon la saison. La mise à jour de la BD ORTHO® a lieu tous les cinq ans en moyenne. Pour les images Landsat 7 ETM+, la fréquence d'acquisition sur une même zone est en moyenne tous les 16 jours.

- La base de données Carte Forestière

L'Inventaire Forestier National, fusionné avec l'IGN depuis 2012, effectue des relevés sur l'ensemble de la forêt française et produit des données statistiques. La Carte Forestière représente les formations végétales caractérisées selon la composition en essences principales et la densité du couvert (IGN, 2012). La version 2 produite depuis 2007, possède une précision géométrique élevée, en planimétrie de 10 m, ainsi qu'une uniformisation des valeurs d'attributs sur tous les départements. Le nombre de classes de valeurs pour l'attribut de qualification des formations végétales est de 32 dans la version 2. Le nombre de classes dans la version 1 varie selon les départements. Elle est de 34 classes pour le département du Bas-Rhin. La Figure II.26 présente la mise en cohérence entre l'actuelle couche de végétation IGN et de la Carte Forestière version 2. L'enrichissement thématique concerne uniquement les forêts.

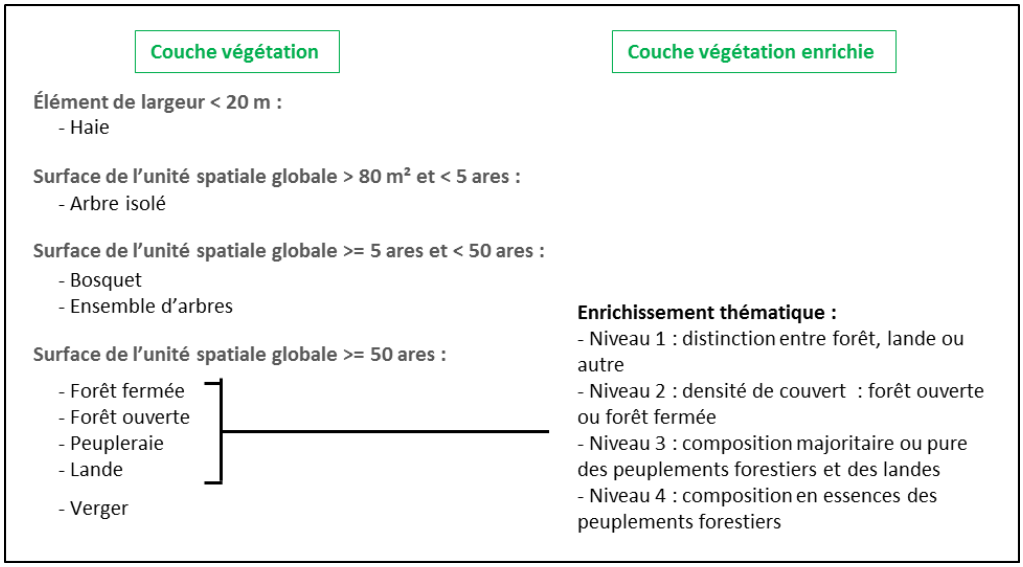


Figure II.26. Mise en cohérence entre les données cartographiques de la couche végétation de l'IGN et les données de la couche végétation enrichie après le travail de l'Inventaire Forestier, d'après IGN (2012).

La base de données Carte Forestière V2 contient les surfaces concernées par la nomenclature de plus de 0,5 ha alors que la V1 prend en compte les surfaces supérieures à 2,25 ha. La caractérisation de la composition des essences dans les forêts fermées s'effectue à partir de 2 ha. La mise à jour de la V2 est annuelle alors que celle de la V1 était décennale, ce qui permet d'avoir à présent un suivi plus régulier des évolutions et une estimation plus précise des modifications, comme par exemple suite à une tempête ou une exploitation. Comme les données du Fond Vert de la BD TOPO®, la version 2 de la base cartographique forestière est disponible parmi les sites d'étude de la thèse uniquement sur le département du Bas-Rhin. Tous les départements ont une base cartographique version 1 existante de moins de 10 ans.

- Le Registre Parcellaire Graphique

Le Registre Parcellaire Graphique (RPG) est une base de données produite par l'Agence de Services et de Paiement et le Ministère en charge de l'agriculture[31]. Il est réalisé tous les ans sur l'ensemble du territoire français. Il décrit l'occupation du sol agricole selon une nomenclature de 28 classes. La saisie des parcelles s'effectue à partir de la BD ORTHO®. La précision correspond à une échelle spatiale de 1 : 5000ème, soit une précision géométrique autour du mètre. Les données sont visualisables à partir du Géoportail[32]. En 2012, les années de 2007 à 2010 sont consultables. Ces données agricoles sont intéressantes car elles concernent des occupations du sol qui ne sont pas comprises dans la BD TOPO®.

- La base de données européenne CORINE Land Cover

Cette base de données décrit l'occupation du sol de façon exhaustive dans l'Union Européenne. Le programme est encadré par l'Agence européenne de l'environnement qui délègue la réalisation de la base à chaque pays. Elle est saisie à partir de sources d'images aériennes, satellitaires et de cartographies, et elle est souvent en cohérence avec des bases de données nationales comme c'est le cas en France avec la BD CARTO®. La nomenclature pour la France comprend cinq thèmes, eux-mêmes découpés en 44 classes au total. Les spécifications indiquent qu'une surface d'occupation du sol est prise en compte si elle se distingue de son voisinage, si elle est relativement homogène et si elle a une superficie supérieure à 25 ha. L'échelle cartographique adaptée est considérée comme étant le 100 000ème (voir les cartes en Annexe 1). Trois jeux de données, datés de 1990, 2000 et 2006, sont disponibles en téléchargement[33]. La base CORINE Land Cover donne une description de l'espace continue et à plus petite échelle que le RGE®. Elle donne une description des types d'occupation du sol plus agrégée que les données du RGE®. Par exemple, seules les grandes infrastructures de transport sont indiquées, ainsi que les zones bâties importantes. Les contours des forêts sont également moins précis.

La temporalité des données

Les localisations d'animaux ont été enregistrées entre 2003 et 2010. Les dates sont décalées par rapport aux différentes sources de données géographiques. Les dates d'acquisition des données géographiques ne sont pas identiques, mais toutes font l'objet de mises à jour régulières et correspondent à une situation observée il y a moins de dix ans. La correspondance entre la réalité de terrain à l'époque des relevés sur la faune et la description de l'espace n'est pas toujours vérifiée. Les données géographiques peuvent être antérieures ou postérieures aux localisations. L'aspect multisource des données et des observations sur le terrain favorise l'identification des évolutions spatiales. Les taux de modifications peuvent cependant être considérés comme faibles dans la plupart des cas d'étude qui présentent un décalage entre les données d'au plus cinq ans. Les modifications existent cependant et concernent un nombre d'objets et une emprise spatiale divers : construction d'un lotissement, abattage d'un arbre, rotation des cultures. Le Tableau II.5 résume les dates des données manipulées et leurs précisions géométriques.

[31] Le site Web correspondant est : [http://www.asp-public.fr/].
[32] Site Web : [http://www.geoportail.gouv.fr]
[33] Les données sont disponibles à partir du site Web suivant : [http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/donnees-ligne/li/1825/1097/occupation-sols-corine-land-cover.html].

Tableau II.5. Les précisions géométriques et les dates des principales données sur la faune et sur la description de l'espace manipulées lors de la thèse.

données	date / dernière mise à jour	échelle spatiale / pas / surface minimale prise en compte	précision géométrique planimétrique	précision géométrique altimétrique
localisations VHF	2003 à 2005		50 m	pas de valeur
localisations GPS	2004 à 2010		20 m	> 20 m
BD TOPO®	2009	5000ème	1 m	1 m
RGE®ALTI	2009	25 m		1 m
BD ORTHO®	2009	20 à 50 m		pas de valeur
Carte Forestière V2	2012	0,5 ha	10 m	pas de valeur
CORINE Land Cover	2006	25 ha / 100 000ème		pas de valeur

Les données présentées représentent le matériel de notre travail. L'étude de l'influence des éléments du paysage sur les déplacements d'animaux repose sur une utilisation des données et leurs imperfections diverses ont forcément un impact sur les analyses. Nous aborderons ce point dans la présentation de la méthodologie et des résultats.

3.3. La méthodologie proposée

Nous présentons la méthodologie élaborée pour répondre à la problématique de la thèse, décomposée en différentes étapes pour analyser les données et pour lancer des simulations de trajectoires d'animaux. Nous donnons une vue d'ensemble de la méthodologie adoptée afin de répondre à nos questionnements, avant de la détailler dans les chapitres III et IV. Les relations entre les éléments du paysage et les déplacements de la faune sont étudiées en intégrant des données sur la description de l'espace et des données sur des localisations enregistrées. La modélisation de données proposée ensuite a pour but d'organiser les concepts et de définir un modèle de simulation de trajectoires. Les trajectoires simulées prennent en compte les comportements de déplacement des espèces et l'appréhension des éléments du paysage. Nous avons défini notre méthodologie en nous appuyant sur les études et des recherches existantes. Comme vu au chapitre I, de nombreux travaux ont été réalisés pour identifier les effets du paysage sur la présence et les déplacements de la faune. Nous avons adapté certaines méthodes d'analyse en fonction de notre problématique et en tenant compte de la particularité de nos cas d'étude et des données dont nous disposons. L'originalité de la thèse réside dans l'analyse conjointe de localisations d'animaux et de données spatiales à grande échelle. L'approche prend en compte différentes espèces et plusieurs types d'espaces, correspondant à une diversité de cas. Cela a pour but de nous permettre de tester ensuite les effets d'aménagements sur les déplacements.

3.3.1. Caractérisation des déplacements et des lieux parcourus

Nous posons chacun de nos questionnements, avant de proposer une méthode pour tenter d'y répondre. Ceux-ci peuvent principalement se formuler ainsi :

- Quelles sont les distances parcourues par les animaux et quelles sont leurs activités ?
- Où se situent les animaux et quels sont les éléments du paysage situés à proximité ?

- Par où passent les animaux ? Y a-t-il des lieux où ils ne passent pas et où ils vont peu, compte-tenu du site d'étude considéré ?
- Dans quelle mesure les données utilisées nous permettent d'identifier l'influence du paysage sur les déplacements ?

Les distances et les rythmes de déplacements

Une première question se pose à propos des vitesses de déplacements et des distances parcourues. Nous cherchons aussi à identifier où l'animal reste longtemps et où il reste peu. Les rythmes de déplacements correspondent aux activités des individus, par exemple une phase de repos ou une phase de mouvement rapide. Ils peuvent être associés aux vitesses estimées à partir des trajectoires. Nous appelons trajectoire la géométrie linéaire obtenue par interpolation des localisations (que l'on nomme trace), associée aux informations temporelles.
Pour caractériser ces rythmes, l'information des localisations seules, c'est-à-dire sans description de l'espace, est intéressante. Nous estimons les vitesses à partir des distances euclidiennes entre les localisations connues, même si ce calcul sous-évalue les distances. En effet nous ne pouvons pas détecter les pauses courtes. De plus la distance considérée est celle du plus court chemin généralement non suivi par les animaux. Nous représentons les vitesses en fonction de la date, ce qui permet de visualiser les différences de vitesses selon les heures de la journée. Les rythmes concernent plusieurs temporalités, en particulier dans le cas de la faune les rythmes journaliers et les rythmes saisonniers. Nous nous intéressons également aux différences entre les périodes de l'année, selon la disponibilité des données, c'est-à-dire parmi nos cas d'étude les chevreuils et les cerfs de La Petite Pierre et les chevreuils à Aurignac.
Nous cherchons également à identifier les lieux de pauses et les lieux où les animaux se déplacent sur de longues distances. Nous proposons de segmenter les trajectoires en déplacements rapides et en pauses selon certains seuils de vitesses et de distances. La segmentation est intéressante à intégrer avec les données géographiques. Cela permet de placer les déplacements selon leur rythme dans un contexte spatial (Figure II.27). Cela peut affiner la caractérisation et aider à déterminer si l'individu est à l'arrêt ou en train de se déplacer sur des distances plus ou moins grandes.

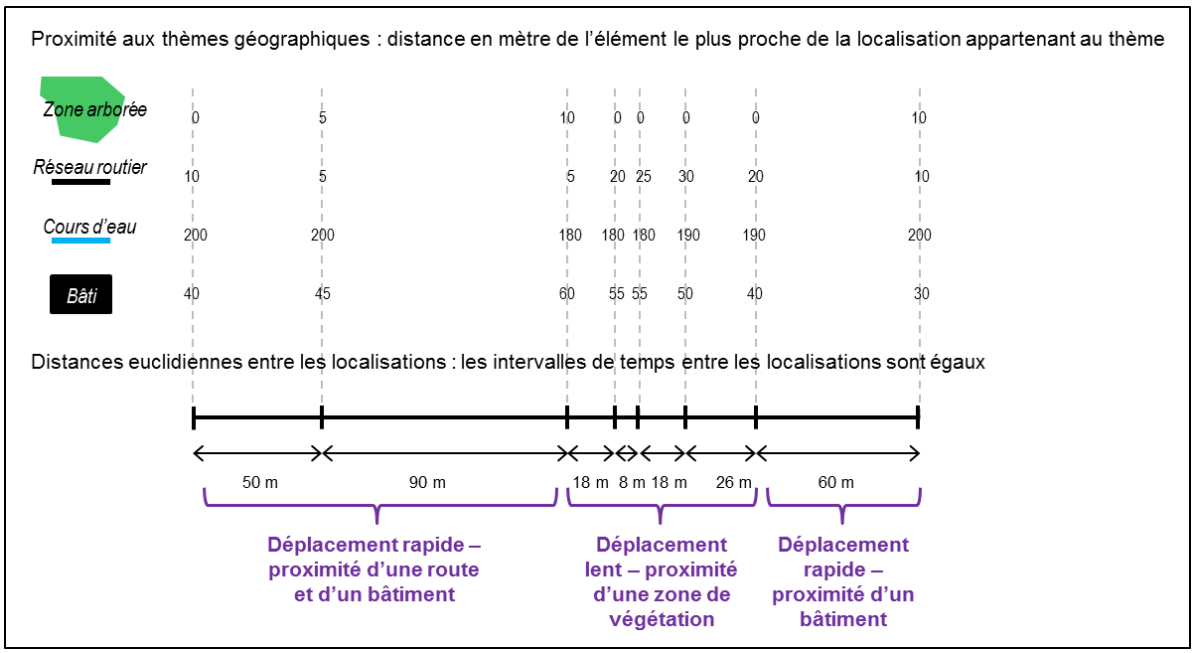


Figure II.27. Segmentation théorique d'une trajectoire spatio-temporelle et son contexte spatial.

La recherche de corrélations entre les rythmes de déplacements et les éléments du paysage concerne des déplacements pouvant être qualifiés de quotidiens dans la plupart de nos cas d'étude. Quelques déplacements exceptionnels sont contenus dans les données. Ils concernent des déplacements de dispersion définitive de jeunes individus, et des dispersions temporaires d'adultes lors de la période de reproduction. Nous étudions les déplacements dans l'optique de permettre leur prise en compte dans des aménagements ou suite à des modifications dans le paysage. Nous considérons que les comportements de préférence ou d'évitement de certains éléments du paysage par les espèces lors de déplacements quotidiens restent valables lors des déplacements sur de plus longues distances. Cette validité est probable, même si elle est à modérer en termes d'importance. Par exemple, une route peut représenter un obstacle et est donc évitée lors de déplacements quotidiens, mais elle peut être traversée si le besoin de migration est important. Les trois espèces suivies ont des déplacements avec des caractéristiques différentes. Pour les comparer, nous proposons de décrire les traces linéaires en calculant les distances entre les localisations et les angles relatifs, comme illustré Figure II.28. Ces indices sont utilisés dans la littérature pour mettre en évidence des différences de comportements entre les espèces : importance des déplacements rapides, des déplacements lents, sur des grandes ou des petites zones.

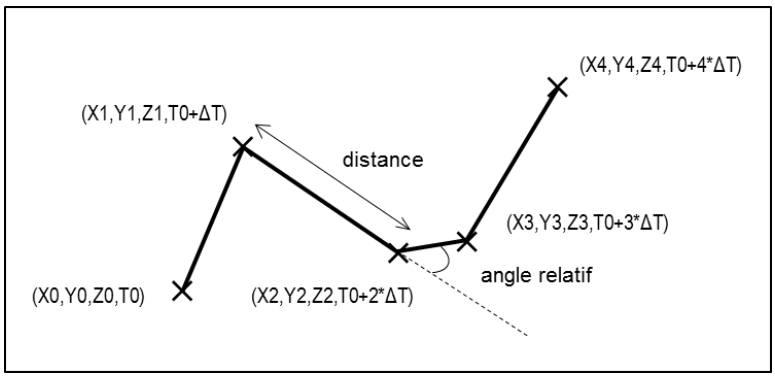


Figure II.28. Traces linéaires construites à partir de localisations connues par leurs coordonnées spatio-temporelles. Calcul des distances et des angles relatifs entre les points. Dans cet exemple, les intervalles de temps sont réguliers.

Les localisations seules sont également intéressantes pour déterminer le domaine de vie des animaux, qui est l'espace parcouru fréquemment. Il est par exemple possible d'utiliser les méthodes s'appuyant sur les polygones convexes comme vu dans le chapitre I. Ces domaines de vie permettent de caractériser l'emprise de l'ensemble des déplacements. Nous pouvons ainsi comparer les caractéristiques des domaines de vie entre les individus et entre les espèces animales.

La situation des animaux par rapport aux éléments du paysage

Nous étudions la localisation des animaux afin de rechercher à terme si des corrélations existent entre leur présence et celle d'éléments du paysage. Ces corrélations peuvent se révéler ou non être des relations de causalité. Cette approche a pour finalité l'identification des données géographiques à utiliser lors de projets d'aménagement du territoire, afin de prendre en compte les comportements de déplacements de la faune sauvage. La démarche adoptée consiste à explorer les différents éléments du paysage et à vérifier l'existence de préférences spatiales ou de comportements d'évitement. Pour cela, on examine les localisations des individus en fonction de leur fréquence. Nous cherchons d'abord à identifier quels sont les éléments à proximité des animaux. Nous proposons de calculer les distances séparant les localisations des éléments du

paysage. Les distances peuvent être mesurées entre une localisation et l'objet géographique appartenant au thème situé au plus proche de la localisation : c'est alors une distance minimale, comme illustrée en Figure II.29.

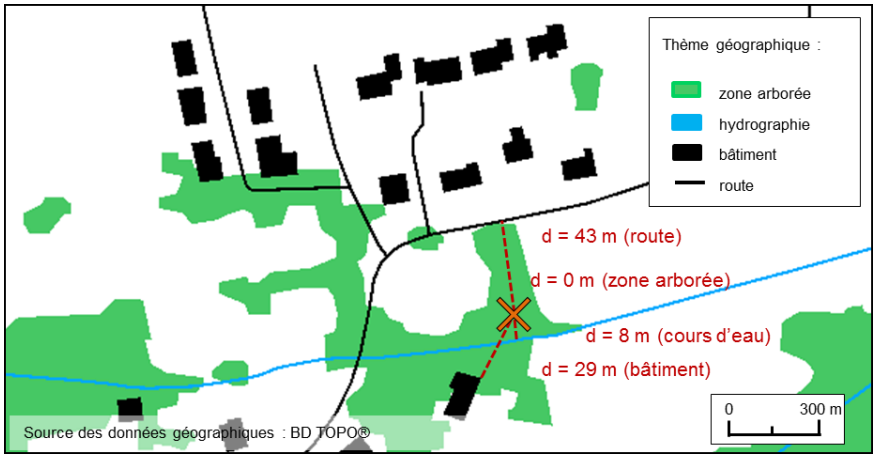


Figure II.29. Calcul des distances minimales entre une localisation fictive et les thèmes géographiques : zone arborée, hydrographie, bâti et route.

Les distances sont également exprimées par des moyennes, même si ces valeurs sont plus difficiles à apprécier. Il s'agit, sur le site d'étude, de calculer la moyenne des distances entre chaque localisation et tous les éléments du paysage dans un voisinage limité, en-dessous d'une distance seuil par rapport à la situation de l'animal. Nous proposons ensuite de caractériser ce voisinage spatial. L'objectif est de comparer si certains éléments du paysage sont plutôt observés à proximité des localisations, par rapport à la caractérisation d'un voisinage plus large. Nous déterminons la composition de l'espace dans un cercle autour de chaque localisation, dont nous faisons varier le rayon afin d'étudier le changement de la composition selon un gradient de distance par rapport aux localisations (voir plus loin la Figure II.30). La caractérisation va ainsi d'un voisinage proche à un voisinage plus large.

Les chemins empruntés par les animaux

Nous souhaitons identifier les lieux de passage des animaux et voir si ces lieux ont des caractéristiques communes. Les données sur les déplacements se présentent sous forme discontinue. Cependant une haute fréquence temporelle des relevés permet d'approcher les chemins empruntés réellement. Pour les individus ayant des localisations à des intervalles de temps courts, nous proposons de caractériser le voisinage spatial des traces linéaires. De même que pour la caractérisation du voisinage des localisations, nous faisons varier l'importance du voisinage considéré, comme illustré en Figure II.30.

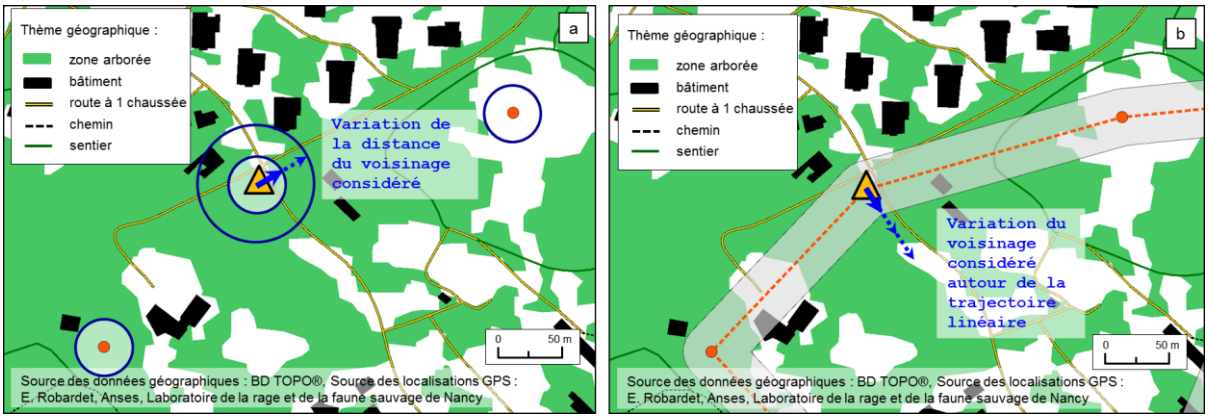


Figure II.30. a) Caractérisation du voisinage des localisations : la composition en éléments du paysage varie en fonction de la distance considérée autour des localisations. b) Caractérisation du voisinage spatial autour de la trace linéaire construite.

La caractérisation de la composition du paysage dans des voisinages d'emprises différentes a pour but d'évaluer si des occupations du sol sont préférées par les animaux, en particulier lors de leurs déplacements, et d'apprécier à quel rayon de distance cette composition du paysage influe sur les déplacements. Le voisinage proche des localisations enregistrées peut présenter des caractéristiques différentes par rapport à un voisinage plus étendu. Nous proposons également de comparer la composition en occupation du sol dans le voisinage proche avec celle dans le domaine vital estimé des individus. Cette comparaison vise à déterminer l'importance relative des natures d'occupation du sol, et de leurs disponibilités en ressources, dans le domaine de vie et autour des trajectoires de déplacements. Les comparaisons concernent les paramètres suivants :

- proximité aux éléments topographiques selon les thèmes et selon certaines valeurs d'attributs ;
- superficie des types d'occupation du sol ;

Dans la caractérisation des préférences spatiales, nous prenons également en compte les vitesses estimées des déplacements, qui indiquent si les animaux sont en repos ou en mouvement et potentiellement en stress. Nous recherchons à identifier si certaines relations entre déplacements et des combinaisons de composantes paysagères sont mises en évidence et si elles sont significatives.

Caractérisation de l'espace parcouru

Les analyses sur l'appréhension de l'espace par les animaux concernent différentes emprises : autour des localisations ponctuelles, autour des trajets continus reconstruits. Elles portent aussi sur le domaine de vie estimé. La caractérisation du paysage dans l'ensemble de l'espace parcouru est nécessaire pour interpréter les distances locales et finalement pour voir quels étaient les choix de trajets possibles pour un animal. Nous souhaitons qualifier le rôle qu'ont les éléments du paysage sur les déplacements en prenant en compte leur configuration dans le contexte paysager. Le paysage est analysé indépendamment de la faune afin de mettre en évidence les interactions entre les différents éléments, par exemple entre l'hydrographie et le relief. Il est intéressant de caractériser ainsi le paysage afin d'établir des profils paysagers, c'est-à-dire une association de facteurs paysagers commune à plusieurs zones. La caractérisation de la connectivité des éléments du paysage représente un autre aspect de cette caractérisation. L'analyse de la continuité de la végétation semble en particulier pertinente dans le cas des déplacements d'animaux. Nous verrons que les analyses mises en œuvre afin de caractériser l'espace dépendent des cas d'étude. Les sites d'étude correspondent aux différents types de

milieux dans lesquels vivent les espèces étudiées. Nous nous intéressons ainsi à certaines variables de l'espace géographique en particulier :

- en milieu périurbain : densité du bâti, réseau routier, présence de zones industrielles ou d'activités, caractérisation de la superficie et de la continuité des zones arborées ;
- en milieu forestier : caractérisation des essences d'arbres, du relief, des routes forestières et des chemins ;
- en milieu agricole : caractérisation des zones arborées, du bâti et du réseau routier, prise en compte des types de cultures.

Selon les types de zones géographiques, différents éléments du paysage sont présents. Ce ne sont donc a priori pas les mêmes éléments qui influencent la présence et les déplacements de la faune selon les sites d'étude.

Les connaissances fournies par les données

Nous nous posons la question de savoir si les données que nous avons utilisées permettent de caractériser de façon fiable les déplacements et leur situation par rapport aux éléments de l'espace. L'analyse des relations entre localisations enregistrées et données géographiques reste assujettie aux spécifications de ces données. Une observation directe des terrains d'étude a été réalisée afin de comparer les données géographiques utilisées et la réalité. Cette démarche a pour but de mettre en évidence des éléments de l'espace qui n'ont pas été saisis dans les bases de données et qui pourraient expliquer certains choix de déplacements des individus suivis, comme par exemple des clôtures. Un décalage entre la date d'observation du terrain et la date d'enregistrement GPS est également inévitable. Cependant il est possible de recouper les informations issues de différentes sources de données géographiques avec celles provenant des observations et des recherches sur le terrain. Ce recoupement permet de connaître les changements survenus dans les sites d'étude depuis la réalisation du suivi des animaux. Nous avons effectué des observations sur l'ensemble des terrains d'étude. Pour les données de déplacements concernant peu d'individus et sur des durées courtes, nous avons pu parcourir la majorité des lieux de déplacements. Pour les échantillons de données plus larges, nous nous sommes concentrée sur des endroits précis. Nous nous interrogeons sur l'adaptation des données géographiques utilisées pour comprendre les déplacements de la faune. Les questions se posent à propos de :

- l'exhaustivité des données qui concernent les thèmes considérés présents dans la base, et celle des valeurs d'attributs ;
- l'échelle spatiale qui comprend la précision géométrique et les critères de sélection dans la saisie des données géographiques.

Par un travail de comparaison entre les informations issues des bases de données géographiques et les observations de terrain, nous souhaitons qualifier les données géographiques quant à leur adaptation aux études de déplacements de la faune et donner des recommandations en vue de leur future intégration dans d'autres études.

3.3.2. Le modèle de simulation et les effets des aménagements sur les déplacements

Dans une deuxième étape de notre démarche méthodologique, nous utilisons les résultats obtenus à partir des questionnements posés sur le comportement spatial des animaux afin de proposer un modèle de simulation de trajectoires. La simulation est utile du fait de la rareté des données sur les déplacements réels. Le besoin d'évaluer les impacts éventuels des aménagements se situe en amont et en aval de leur mise en place. Cette évaluation s'appuie sur des hypothèses de réponse des animaux aux éléments du paysage et en particulier aux infrastructures qui font obstacle à leurs déplacements. Nous partons de connaissances sur les

déplacements de faune que nous formalisons et organisons dans un modèle de données. Ces connaissances sont celles décrites dans la littérature. Elles sont également constituées des hypothèses qui sont issues des résultats des analyses de données. Nous définissons un modèle de données qui prend en compte les différents éléments du paysage et leur rôle, par exemple des obstacles ou des corridors favorables au déplacement selon les espèces. Il prend également en compte le temps, par la chronologie des déplacements et par les changements du paysage (Figure II.31). Une lecture plurielle d'un même espace est donc possible. Un même élément du paysage peut avoir une influence différente sur un animal selon son type et son voisinage spatial, selon la date considérée dans le rythme journalier et annuel et selon l'espèce et le comportement individuel de l'animal.

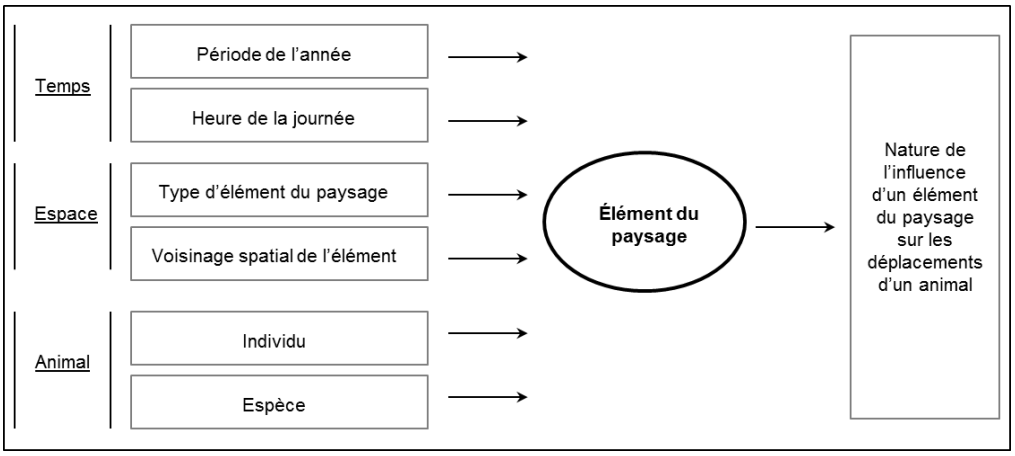


Figure II.31. Les éléments du paysage ont une influence qui peut être différente sur les déplacements d'animaux, en fonction du contexte temporel, paysager et selon les différences entre individus et entre espèces.

Nous avons opté pour une méthode de simulation des déplacements qui s'appuie sur le modèle de données décrivant la caractérisation de l'espace et des déplacements. Notre méthode de simulation se base sur les modèles orientés agent. Nous reviendrons sur les raisons de ce choix dans le chapitre IV-2. La modélisation agent a été utilisée dans plusieurs approches en sciences humaines (par exemple, simulation de déplacements de piétons dans le projet MIRO, 2006), ainsi qu'en écologie car elle offre la possibilité de modéliser les comportements des animaux et leurs interactions avec les éléments de l'environnement comme par exemple des ressources (Mechoud *et al.*, 2000). La modélisation agent présente l'intérêt de permettre une représentation directe des individus qui se déplacent. Elle nous permet de prendre en compte des comportements propres aux espèces ainsi qu'une variabilité interindividuelle. Un agent est un animal. Celui-ci interagit avec son environnement : il s'agit ici de son environnement spatial incluant les différents éléments du paysage. Un agent perçoit son environnement et se déplace à l'intérieur, en fonction des caractéristiques de cet environnement et de ses propres capacités. La simulation s'appuie sur les données de déplacements observés, issues des cas d'étude. L'environnement spatial est représenté à partir des données géographiques à grande échelle présentées dans la partie II-3.2, et vérifiées en partie par des observations de terrain. Cette approche nous permet de tester la pertinence des données géographiques et de leur modélisation dans le cadre de la compréhension des déplacements de la faune. La Figure II.32 illustre le cheminement entre les parties d'analyse de données, de modélisation et de simulation.

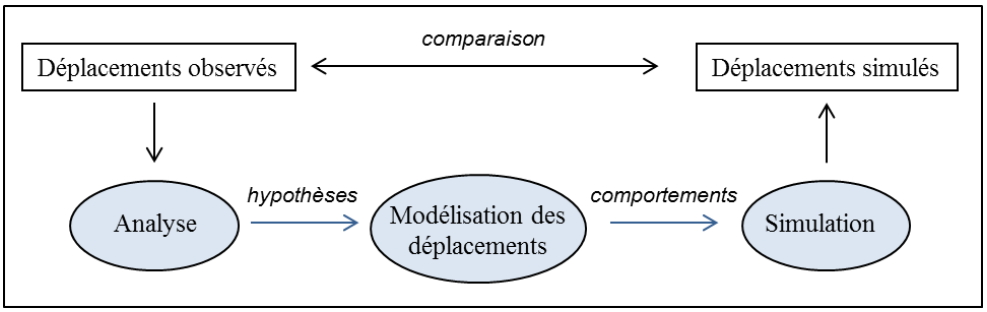


Figure II.32. Les liens entre les étapes d'analyse, de modélisation et de simulation des déplacements et de l'influence de l'espace, schéma d'après Multon (2006).

Nous nous concentrons sur l'appréhension des éléments du paysage par les animaux lors de leurs déplacements. Notre fonction de construction des déplacements intègre ainsi une lecture des données géographiques selon un des rôles définis précédemment : obstacle, élément favorable au déplacement, élément d'intérêt et élément évité, élément neutre. Le comportement de l'animal est modélisé selon les besoins et le rythme de déplacements de son espèce. Nous incluons une variation liée aux comportements individuels. Nous ne cherchons en revanche pas à intégrer les interactions entre les individus ni les dynamiques de compétition entre les espèces, qui constituent des problématiques éloignées de la nôtre. Les étapes de définition du modèle de simulation sont : la détermination des paramètres intervenant dans les déplacements de la faune en fonction des espèces, la définition du modèle agent, puis l'évaluation et la validation de ce modèle. Nous présentons ci-dessous brièvement ces paramètres. Un déplacement est le résultat d'une combinaison de facteurs. La conceptualisation d'un déplacement dépend donc également d'un ensemble de paramètres et de fonctions. Afin de simuler un déplacement, nous construisons un objet trajectoire. Cet objet est constitué de localisations définies de proche en proche, comme illustré Figure II.33. Une trajectoire construite par simulation implique la définition d'une fonction de déplacement associée à l'agent. Les paramètres de cette fonction sont alors : un point de départ, une destination choisie par l'animal, des choix de directions en fonction des caractéristiques de l'environnement spatial, un pas de temps entre les points de la trajectoire créée.

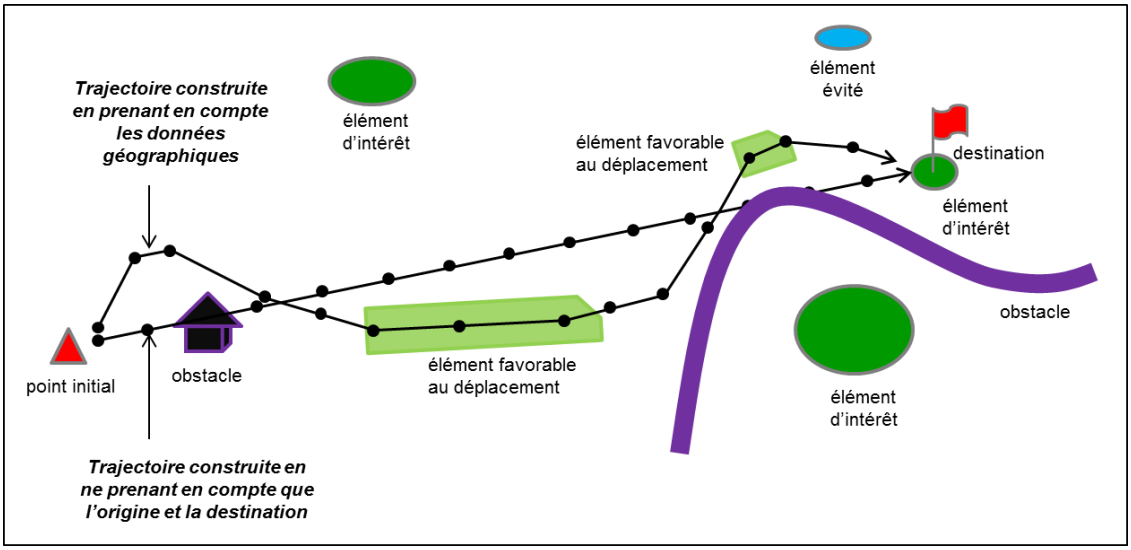


Figure II.33. Ce qu'implique la construction d'une trajectoire point par point : origine, destination, pas de temps et prise en compte des données géographiques.

Le modèle de données est implémenté afin de lancer des simulations et de créer des trajectoires numériques. Cette implémentation[34] nous permet de tester les choix de modélisation. Elle intègre les données géographiques à différents niveaux de détail et les résultats d'analyses des relevés de la faune. L'enjeu est de définir un modèle assez flexible qui s'adapte aux comportements des espèces et qui prenne en compte les types d'influences des éléments du paysage sur les déplacements. Suite à l'implémentation du modèle, des scénarios de simulation peuvent être lancés. Nous définissons un protocole de test concernant les trois espèces étudiées dans nos cas d'étude – le renard, le chevreuil et le cerf – et plusieurs zones géographiques. Les tests concernent deux aspects :

- les scénarios de comportement de déplacement des animaux ;
- les scénarios de modification de l'espace.

Les scénarios ont pour principal objectif de tester les effets d'aménagements. Le but est aussi de vérifier si la prise en compte des données géographiques est pertinente pour étudier les déplacements de la faune et pour évaluer les hypothèses sur les déplacements en fonction des espèces. Les résultats des scénarios sont d'une part comparés avec les déplacements observés et d'autre part comparés entre eux afin d'identifier les différences entre des situations d'avant et d'après modifications du paysage.

Au final, les traitements développés lors de la thèse sont intégrés dans un module informatique développé dans la plateforme préexistante GeOxygene. Ce module accepte en entrée les sources de données numériques manipulées lors de la thèse. Il réalise les étapes définies de visualisation, d'analyse et de simulation, comme illustré en Figure II.34.

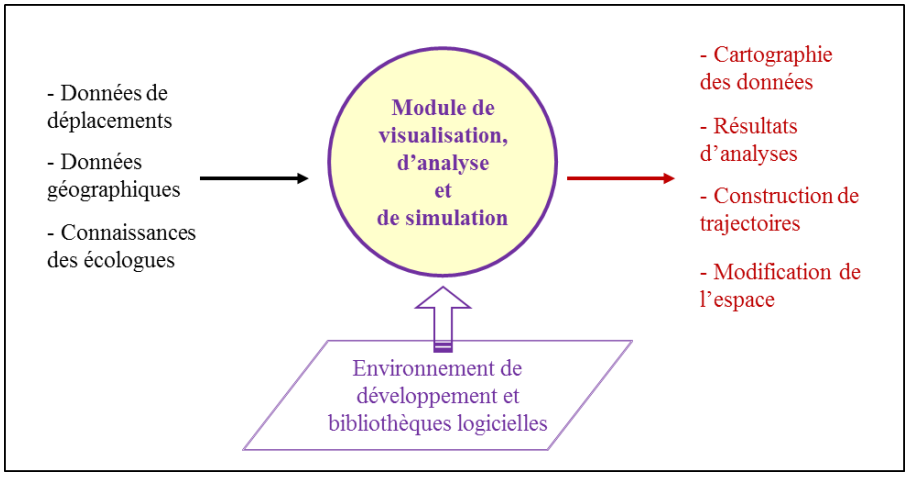


Figure II.34. La mise en place d'un module pour étudier les relations entre paysages et déplacements à partir des étapes méthodologiques définies.

3.4. Les ressources logicielles utilisées

Il est nécessaire d'utiliser des ressources logicielles et des bibliothèques informatiques afin de lire les données et de les analyser. Le modèle de données est défini dans un formalisme orienté objet et est édité grâce à des outils existants. L'implémentation du modèle de simulation nécessite des bibliothèques informatiques pour construire des trajectoires et pour visualiser les résultats. Notre approche est d'employer plusieurs ressources informatiques adaptées à chaque étape. Les types de logiciels et de ressources sont énoncés en Figure II.35 et sont présentés ci-

[34] Nous décrivons cette implémentation et les ressources logicielles utilisées dans le chapitre IV-2.4.

après. Nous avons privilégié les ressources open source ou libres, qui sont accessibles en ligne avec des communautés actives d'utilisateurs.

Plateformes de développement	Systèmes d'information géographiques	Logiciel d'analyse du paysage	Outil de modélisation	Système de gestion de base de données
- visualisation - analyse - simulation	- visualisation - analyse spatiale	- calcul d'indices du paysage	- édition du modèle de données	- enregistrement et organisation des données et des résultats

Figure II.35. Les ressources logicielles et de programmation utilisées dans la mise en œuvre de notre méthodologie.

Nous avons choisi dans un premier temps d'utiliser la plateforme informatique GeOxygene développée au laboratoire COGIT. Cette plateforme SIG comprend l'implémentation d'un modèle orienté objet dédié à l'information géographique et répondant aux spécifications de l'OGC® et de l'ISO[35]. Le code est téléchargeable à partir du site [http://oxygene-project.sourceforge.net/]. Son utilisation est soumise à la licence LGPL GNU[36] et le code est en open source. Les méthodes créées dans la plateforme le sont dans le langage de programmation Java. Les avantages de ce langage sont l'existence de nombreuses bibliothèques d'analyses développées ou adaptées en Java ainsi que les nombreuses ressources d'aide disponibles (Badard & Braun, 2004). L'intérêt d'utiliser une plateforme unique pour effectuer les développements est que cela permet un appel à partir d'une interface commune aux différentes fonctions souhaitées. Dans notre cas, nous avons implémenté la majorité des fonctions de visualisation, d'analyse et de simulation dans GeOxygene. La plateforme offre des interfaces graphiques afin de visualiser des données et d'en paramétrer la cartographie. Nous utilisons en particulier le module GeOxygene 3D d'analyse des données en trois dimensions et l'interface graphique associée, illustrée en Figure II.36 (Brasebin, 2009). La visualisation en 3D par cette interface est intéressante car elle offre l'opportunité de paramétrer la symbolisation des données géographiques en format vecteur (couleur et ombrage des bâtiments, largeur des routes) et leur plaquage sur le MNT. Il est également possible de créer de nouvelles entités à partir de cette interface graphique. Dans notre cas, cela nous permet d'ajouter une route ou une zone arborée en guise d'aménagement du territoire, et de tester les conséquences sur les déplacements simulés. Les trajectoires peuvent être cartographiées de manière dynamique. Nous développons une extension de ce module. Les fonctions implémentées sont accessibles à partir de l'interface graphique ainsi que leur fenêtre de paramétrage. À terme, les fonctions développées sont destinées à être livrées en open source dans un module de GeOxygene.

[35] OGC® : l'*Open Geospatial Consortium* [http://www.opengeospatial.org/] est une organisation internationale qui définit des standards dans le domaine de l'information géographique.
ISO : ce sigle est celui de l'*International Organization for Standardization* [http://www.iso.org/].

[36] LGPL GNU : La Licence publique générale GNU amoindrie concerne des logiciels libres. Elle permet de faire appel à des bibliothèques qui ne sont pas déclarées dans cette même licence (source : [http://www.gnu.org/).

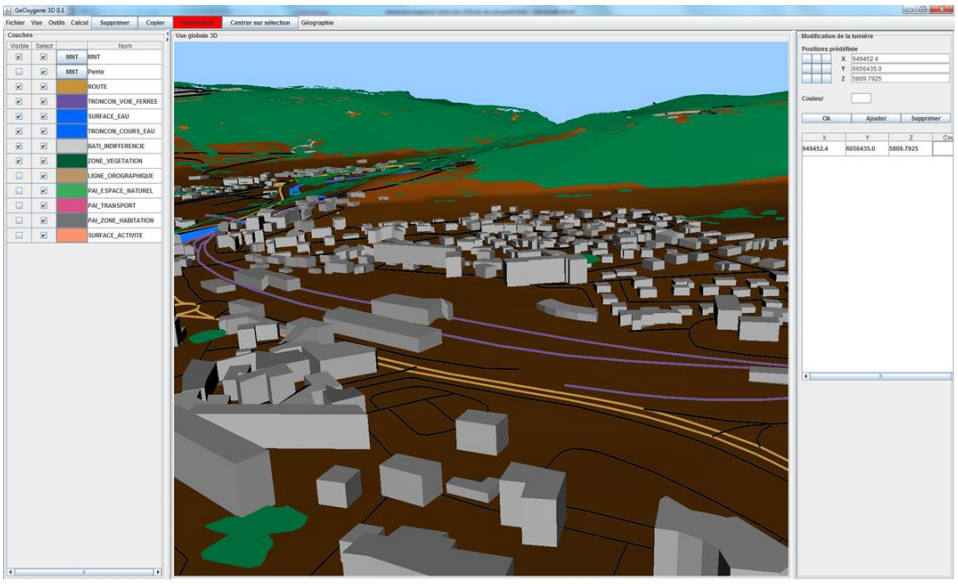


Figure II.36. L'interface graphique de GeOxygene 3D : elle permet la visualisation et l'analyse en 3D de données numériques. Des fenêtres pour le paramétrage de l'affichage et pour le lancement de fonctions spécialisées sont disponibles. Ici, la partie sud du site de Pontarlier est représentée : bâtiments, routes, voies ferrées, zones arborées, hydrographie, MNT. Sources des données géographiques : BD TOPO® et RGE®ALTI.

L'accès à la plateforme GeOxygene s'effectue via le logiciel de développement Eclipse[37]. Cet environnement de développement nous permet de créer de nouvelles classes informatiques (correspondant à un concept modélisé) et de nouvelles méthodes (fonctions d'analyse ou de simulation par exemple), d'organiser le code. La documentation sur les développements peut être automatiquement éditée à partir des commentaires écrits dans le code : description des fonctions, paramètres en entrée, types des résultats. Des modifications dans la plateforme GeOxygene interviennent régulièrement. La synchronisation avec le serveur contenant la plateforme est effectuée par l'outil Apache Maven[38]. Les logiciels de système d'information géographique permettent de visualiser et d'effectuer des analyses sur les données spatiales. Nous avons également utilisé Quantum GIS (source : [http://www.qgis.org/]) et OpenJUMP (source : [http://www.openjump.org/]. Le SIG QGIS est associé aux bibliothèques GRASS (source : [http://grass.osgeo.org/]) qui contiennent de nombreuses fonctionnalités de manipulation et de traitement de données spatiales comme la conversion de formats de données et des analyses spatiales complexes.

PostGIS est une extension du système de gestion de bases de données PostgreSQL (source : [http://www.postgis.fr/]. Il permet de stocker des tables de données et de gérer des relations entre elles comme des relations d'héritage. Des traitements sur les données sont possibles à l'aide de requêtes SQL[39]. Nous utilisons PostGIS afin d'organiser les données géographiques et les données de localisations GPS. Les résultats des simulations y sont également enregistrés.

Les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel R (source : [http://www.r-project.org/]). L'interface de programmation RGui a été utilisée afin de charger les bibliothèques nécessaires et d'éditer le code. Certaines bibliothèques sont notamment consacrées à l'analyse des trajectoires et aux traitements de données géographiques.

Fragstats (McGarigal *et al.*, 2002) est un logiciel d'analyse du paysage. Il réalise des calculs d'indices paysagers à trois niveaux : au niveau du paysage, au niveau des classes c'est-à-dire des thèmes géographiques (par exemple le thème des zones arborées) et au niveau des patchs c'est-

[37] Eclipse est en open source. Le site est [http://www.eclipse.org/].

[38] Apache Maven est un outil voué à la gestion du code informatique (source : [http://maven.apache.org/]).

[39] SQL, *Structured Query Language*, est un langage pour manipuler des bases de données.

à-dire des unités homogènes du paysage (par exemple une zone arborée). Les indices portent entre autres, sur la caractérisation de la répartition spatiale et de la forme des éléments du paysage, sur leur isolement et sur leur connectivité. Nous utilisons ce logiciel afin de caractériser certaines propriétés du paysage en particulier la connectivité entre les unités paysagères.

Nous avons choisi une formalisation en UML (*Unified Modeling Language*) (Rumbaugh *et al.*, 1991) afin de représenter notre modélisation de données orientée objet. Plusieurs types de diagrammes UML existent. Nous utilisons principalement le diagramme de classes qui décrit les concepts et leurs relations. Le logiciel utilisé est Astah[40] pour sa facilité de mise en œuvre et son interface interactive.

Pour l'implémentation du modèle de simulation de trajectoires orienté agent, nous avons utilisé le logiciel Cormas[41] pour une version raster de l'espace, et un code ad hoc développé sur GeOxygene pour la version vecteur. Les logiciels de SMA existants sont souvent dédiés à une application particulière, par exemple aux études sur les écosystèmes ou sur le partage de l'espace entre activités anthropiques et populations animales (Bousquet *et al.*, 2002). Les codes diffèrent sur plusieurs points entre les logiciels : la prise en compte de l'environnement spatial, la définition des comportements des agents, les interactions entre les agents, les sorties d'analyses des résultats de simulation. Nous avons choisi de développer notre propre module pour simuler de trajectoires afin de prendre en compte au mieux les particularités des déplacements étudiés et la modélisation proposée de l'espace vécu par les animaux.

Dans les chapitres suivants sur la présentation des résultats, nous rappelons les ressources logicielles utilisées pour mener à bien les analyses et présenter les résultats. Nous présentons dans le chapitre III la mise en œuvre et les résultats d'analyses des cas d'étude comprenant les données de localisations de faune et des données géographiques associées.

[40] Astah a une version accessible sur le site [http://astah.net/].

[41] Cormas est développé par le CIRAD (Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement). Les ressources sont disponibles à partir de l'adresse [http://cormas.cirad.fr/].

RÉSUMÉ DES CAS D'ÉTUDE ET DE L'APPROCHE

L'approche suivie pour caractériser l'influence des éléments du paysage sur les déplacements de la faune se fait en deux étapes : des analyses de données afin de caractériser le paysage et son influence sur les déplacements et la définition d'un modèle de données sur lequel s'appuient des simulations agent (Figure II.37). Nous souhaitons également évaluer la pertinence des données géographiques dans les études de déplacements d'animaux. Pour les analyses de données, nous nous concentrons sur six cas d'étude concernant plusieurs espèces animales – renard, chevreuil, cerf – et plusieurs types de zones géographiques – périurbain, forestier de petite montagne, agricole. Les données géographiques sont issues du RGE®. Les données sur la faune sont des localisations enregistrées par GPS, provenant de la thèse d'E. Robardet (2007), de l'ONCFS, et de l'INRA, et par la technique VHF, provenant de l'ELIZ. Les connaissances sur les relations entre les éléments du paysage et les déplacements sont conceptualisées dans un modèle de données. Une modélisation agent est proposée afin de lancer des simulations de trajectoires en prenant en compte des comportements différents selon les espèces et les individus.

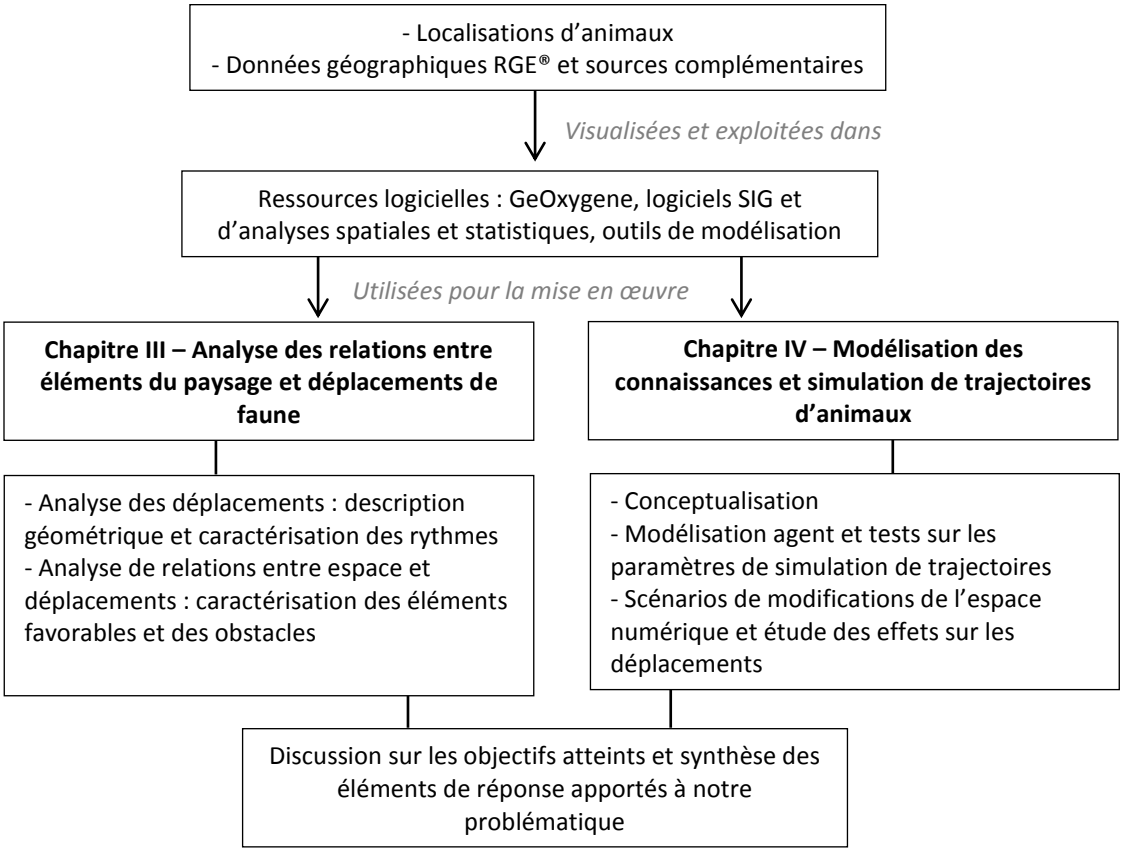


Figure II.37. Organisation des deux chapitres suivants, III et IV, sur la présentation de la mise en œuvre et des résultats.

CHAPITRE III
–
ANALYSE DES DÉPLACEMENTS DE LA FAUNE ET DE L'INFLUENCE DES ÉLÉMENTS DU PAYSAGE

INTRODUCTION

Ce chapitre est consacré à la présentation des résultats se rapportant aux déplacements d'animaux et à la description de l'espace. Dans une première partie, nous nous intéressons aux relevés de localisations. Ces localisations, renseignées par leurs coordonnées spatiales et temporelles, contiennent de nombreuses informations sur l'étendue des déplacements et sur leurs rythmes. La deuxième partie est consacrée aux analyses des relations entre les localisations et les données géographiques. L'objectif est de déterminer si l'influence des éléments du paysage sur les déplacements peut être caractérisée à partir des données disponibles. Des relations sont recherchées entre les variables de l'espace et les déplacements. L'interprétation des relations est énoncée en s'appuyant sur les connaissances des écologues et sur la littérature. Nous cherchons à confirmer certains des résultats obtenus par une approche statistique. Nous opérons pour finir un retour critique sur les méthodes et les résultats dans la troisième partie de discussion et de synthèse.
Les analyses portent sur les six cas d'étude, dédiés à trois espèces – renard, chevreuil, cerf – et des espaces variés – milieu périurbain, forestier, agricole. Afin d'illustrer les méthodes d'analyse mises en œuvre et les résultats, nous nous appuyons soit sur l'ensemble des individus et des sites d'étude, soit sur une sélection d'individus dans les échantillons. Cette sélection s'effectue en tenant compte de l'adaptation du cas d'étude aux objectifs des analyses et de la pertinence des résultats obtenus. Les résultats ne sont pas détaillés de manière exhaustive par souci de clarté. Ils sont ensuite utilisés comme des connaissances intégrées au modèle conceptuel sur les relations entre paysage et déplacement, présenté dans le chapitre IV. Des synthèses intermédiaires des parties thématiques récapitulent les connaissances principales acquises par les données. Certains aspects des analyses sont présentés en annexes. La synthèse finale permet de faire le point sur les analyses menées et sur l'intérêt des résultats selon les cas d'étude.

1) ANALYSE DES DÉPLACEMENTS À PARTIR DES LOCALISATIONS DES ANIMAUX

Comme énoncé précédemment, les enregistrements ont été obtenus par des colliers VHF ou GPS. Selon les techniques de suivi, les spécifications diffèrent et il est nécessaire d'adapter les analyses de données. Les objectifs des analyses varient en fonction de la durée, de la fréquence des localisations et du nombre d'animaux suivis. Différents types de déplacements et différents modes d'utilisation de l'espace sont ainsi étudiés à partir des cas d'étude. Par ailleurs, les données de localisations contiennent des imprécisions et des erreurs. La lecture et la cartographie des données servent à détecter ces problèmes et à mettre en forme ces données pour les analyses. Nous décrivons dans cette partie les informations sur les échantillons de données utiles pour notre recherche sur les relations entre espace et déplacement (III-1.1). Puis nous étudions deux aspects à partir des localisations : la présence des animaux via la détermination de leur domaine vital (III-1.2), et les déplacements par l'estimation des trajectoires linéaires (III-1.3) et par la caractérisation de leurs formes et de leurs rythmes (III-1.4).

1.1. Description et cartographie des données de localisations d'animaux

1.1.1. Contexte environnemental des localisations enregistrées

Les données de localisations correspondent à diverses durées et périodes de suivi selon les cas d'étude. Nous précisons que dans le mémoire, nous appelons « suivi » les localisations dont nous avons disposées pour le travail de thèse. Les suivis font partie d'études plus larges qui peuvent couvrir des durées plus longues que pour nos échantillons. Les spécifications des relevés diffèrent également entre les individus appartenant au même cas d'étude. Par exemple à Pontarlier, ont été suivis :

- un renard adulte (de plus de 2 ans) pendant 6 mois d'août à janvier ;
- une renarde juvénile (de moins de 1 an) pendant 26 jours sur juillet et août.

Sur deux sites d'étude, les différences sont par exemple les suivantes :

- un renard adulte suivi pendant 21 mois dans la région d'Annemasse ;
- un renard adulte suivi pendant 1 journée dans la périphérie de Nancy.

Les trois échantillons sur les renards (Annemasse, Pontarlier, Nancy) sont ceux qui présentent les spécifications les plus variées : par leur techniques de localisation via des dispositifs VHF ou GPS, par leurs durées de suivi entre les individus sur un même site et entre les sites d'étude. Le nombre d'individus suivis est de 4 pour Pontarlier et Nancy, et de 8 pour Annemasse. Les données sur les cervidés sont toutes issues de colliers GPS. Dans les Vosges et à Aurignac, le nombre d'individus (respectivement 3 chevreuils et 3 cerfs, et 70 chevreuils) et la durée (respectivement 5 jours et 10 mois) diffèrent fortement. Les données sur les chevreuils à Aurignac constituent la source la plus riche quant à la taille de l'échantillon, le nombre d'individus et d'enregistrements. Les cartes des sites d'étude sont présentées en Annexe 1 et la description des échantillons de données de localisations est en Annexe 2.

La période de suivi est une indication importante afin de connaître les conditions environnementales lors des enregistrements de localisations et afin de replacer les animaux dans le contexte de leur cycle biologique. Plusieurs aspects temporels peuvent être mentionnés.

- L'année ou les années pendant lesquelles se sont déroulés les suivis :

Pour les renards, les années sont 2003, 2004, 2005 et 2006. Les étés de ces années en France, y compris dans l'est, ont connu des températures supérieures à la moyenne, surtout en 2003 et de

2006[1]. Ces hautes températures ont été accompagnées d'une baisse de la pluviométrie. Les cervidés ont été suivis au cours de l'année 2008 dans les Vosges, et en 2008, 2009 et 2010 à Aurignac. Les années 2008 et 2009 se situent plutôt dans la moyenne climatique. Toutefois, en janvier 2009, la tempête Klaus a traversé le sud-ouest, dont le canton d'Aurignac, dans lequel elle a provoqué des dégâts notamment sur les zones arborées. L'année 2010 a été plus froide que la moyenne, et la plus froide de la décennie précédente. Ces conditions météorologiques sont des tendances annuelles et nous ne cherchons pas à les relier à des caractéristiques des localisations. Il serait en effet nécessaire de disposer des relevés sur les sites d'étude à une fréquence temporelle similaire aux localisations. Des commentaires sur les conditions météorologiques sont uniquement disponibles pour certains relevés de l'ELIZ c'est-à-dire les renards à Pontarlier et à Annemasse, par exemple « pluie » ou « brouillard » au moment des observations.

- La saison :

La saison est à mettre en correspondance avec les cycles biologiques des espèces. Elle est également en lien avec la phénologie des végétaux et des ressources disponibles pour les animaux. Pour les trois espèces étudiées, le printemps et l'été sont les saisons de l'élevage des jeunes. Dans le cas des renards, les deux femelles à Annemasse sont allaitantes au moment de leur capture (Boyer, 2004). L'une des femelles est suivie sur plusieurs mois, ce qui correspond alors une période pendant laquelle elle n'a plus en charge sa portée. Pour chevreuils et les cerfs dans les Vosges, les saisons concernées par les suivis sont le printemps, l'été et début de l'automne, saisons plutôt favorables à une bonne disponibilité des ressources alimentaires végétales. Dans le canton d'Aurignac, les suivis couvrent l'ensemble des saisons d'une même année.

- Les jours :

Le recoupement entre les journées de suivi de plusieurs animaux sur un même site est intéressant pour identifier des interactions potentielles entre les individus. Quelques localisations simultanées sont contenues dans les échantillons. Les localisations de 3 renards sur 4 à Pontarlier ont été enregistrées à des dates identiques et à des heures proches. À Annemasse, les localisations des 4 renards suivis en 2003 présentent également des recoupements de dates. Nous disposons de plusieurs journées communes de suivi sur les chevreuils et les cerfs dans les Vosges, ce qui représente plusieurs localisations séparées d'un intervalle de temps court entre 5 et 15 minutes. Pour les chevreuils à Aurignac, les enregistrements sont synchronisés temporellement, avec un minimum de 4 points par jour à minuit, à 6 h, à midi et à 18 h. Certaines journées correspondent en plus à des relevés toutes les 10 minutes ou toutes les heures sur plusieurs chevreuils. La cartographie des localisations permet de visualiser les emplacements simultanés des individus d'une même espèce et entre deux espèces (chevreuil et cerf dans les Vosges).

- Le moment de la journée :

Le moment de la journée correspond à des activités particulières des animaux et de ce fait à des rythmes de déplacements. Une distinction dans les spécifications des relevés sur les renards par l'ELIZ est opérée entre la période diurne et nocturne. Les relevés ont été plus fréquents la nuit, lorsque les renards sont généralement plus actifs et que les déplacements sont plus importants. Quelques relevés pendant la journée sont également effectués, mais limités à un par jour. À Nancy, les localisations de l'Anses couvrent pour chaque individu une journée entière, jour et nuit, sauf pour un renard dont les localisations ne sont enregistrées que la nuit. Pour l'ensemble des cervidés, les données couvrent indistinctement les différentes heures de la journée. Cela permet d'étudier leurs emplacements en fonction du temps et ainsi les rythmes journaliers.

[1] Source : [http://climat.meteofrance.com/]

Les individus n'ont pas les mêmes caractéristiques et se distinguent au minimum par leur sexe, et par leur âge au moment des captures. En Annexe 2, la description des données est présentée pour chaque individu suivi. Le sexe des individus influence leurs activités et leurs déplacements, qu'ils soient de type journalier, saisonnier ou alors unique (dispersion par exemple). Les mâles peuvent avoir à défendre un territoire en le parcourant. Les femelles s'occupent des jeunes, ce qui limite leurs déplacements. Dans les échantillons, 10 renards mâles sont suivis pour 6 femelles sur l'ensemble des cas d'étude. Pour les 3 cerfs, ce sont uniquement des femelles (biches). Sauf pendant la période de mise bas, les biches vivent en harde. Les biches suivies peuvent alors être représentatives des mouvements du groupe auquel elles appartiennent. Les 3 chevreuils dans les Vosges sont aussi des femelles (chevrettes). À Aurignac, l'échantillon comporte davantage de femelles (40) que de mâles (30). Dans le mémoire, nous nommons par renard, chevreuil et cerf, les individus suivis quel que soit leur sexe afin de faciliter la lecture.
Le rythme biologique est lié à l'âge des individus, et selon les espèces à leur possible intégration dans un groupe. L'âge influence aussi la détermination par un individu d'un domaine de vie et de sa stabilité vis-à-vis de ce domaine. La connaissance des lieux parcourus, notamment dans le domaine vital, s'accroit avec l'âge, de même que la connaissance des dangers. La majorité des renards suivis sont des adultes de plus de 2 ans, avec seulement 3 juvéniles d'environ 1 an. Ces juvéniles peuvent donc être en phase de dispersion, à la recherche d'un nouveau domaine vital. Les cervidés sont également des adultes dans les Vosges. À Aurignac, plus de la moitié des chevreuils sont des jeunes de moins d'un an, pour 24 adultes et 8 yearlings correspondant à la tranche d'âge entre 1 et 2 ans. Les variables de sexe et d'âge des individus sont croisées afin de permettre une première interprétation des déplacements dans le contexte individuel, en plus du contexte de l'espèce.

1.1.2. Contenu des données de localisations

Les prétraitements des données de déplacement ont pour objectif de les rendre utilisables. Les données géoréférencées doivent pouvoir être cartographiées parallèlement à la lecture des informations textuelles qui leur sont associées. Les prétraitements de données concernent leur description, et donc la connaissance de leur contenu, par exemple sur les classes des valeurs attributaires saisies.

Mise en forme des données

Une première étape est la lecture des données et la détermination d'un système de référence commun. Les données GPS fournies par les écologues sont principalement en format texte. Afin d'organiser leur lecture, les données sont importées dans un système de gestion de base de données. Les points GPS sont lisibles dans les systèmes d'information géographique par leurs coordonnées. Les données topographiques sont également intégrées au SIG pour une co-visualisation des différents thèmes. Les fichiers de données contiennent dans tous les cas d'étude plusieurs localisations pour lesquelles sont indiquées les coordonnées spatiales, en planimétrie pour les localisations VHF, et les coordonnées temporelles. Les coordonnées spatiales (x, y) sont fournies soit en coordonnées géographiques par rapport au RGF93 (réseau géodésique français 1993), soit en projection Lambert II étendu, Lambert III ou UTM – Transverse Universelle de Mercator. Le système officiel de référence pour les données du RGE® est le Lambert 93 qui est une projection conique conforme sur le RGF93 (IGN, 2000). Nous avons donc choisi de transformer toutes les coordonnées GPS en Lambert 93. Les données topographiques hors RGE® sont par ailleurs aussi disponibles dans cette projection. La

transformation des coordonnées a été réalisée par le logiciel CIRCE[2] qui minimise les erreurs de calcul. Cette transformation s'appuie sur une grille de passage du NTF au RGF93 pour les coordonnées initiales en Lambert II étendu. Les écarts entre les deux systèmes de coordonnées varient selon les régions. Ils sont relativement élevés dans la région de Nancy et sont modérés dans les autres régions d'étude, tout en restant en-dessous de 10 cm. Nous considérons ces écarts comme négligeables au vu de la précision des données qui est supérieure au mètre. Les coordonnées d'altimétrie sont définies par rapport au réseau de nivellement en France métropolitaine IGN69. Les altitudes des localisations sont converties par rapport à cette référence.
Les informations attributaires contenues dans les fichiers sont soit textuelles, soit sous un format de date, soit numériques. Des fichiers de données sont construits à partir des fichiers texte d'origine sans perte d'informations. Seules des modifications ont été apportées afin d'harmoniser le mode d'encodage textuel, par exemple en supprimant les caractères avec des accents qui peuvent produire des erreurs de lecture selon les configurations des logiciels. Les coordonnées en Lambert 93 ont été par ailleurs ajoutées aux initiales.

Gestion des données manquantes

Les localisations VHF correspondent toutes à des coordonnées car leur calcul est effectué par triangulation à partir d'antennes au sol tenues manuellement. Le GPS est programmé pour enregistrer des localisations à une certaine fréquence temporelle par triangulation à partir des satellites, mais il peut donner des localisations nulles, ce qui est dû à différentes causes mentionnées dans le chapitre I-2.1.3. Les traces GPS peuvent contenir des lignes vides suite à des échecs de positionnement (mauvaise visibilité des satellites, contexte environnemental de l'individu comme par exemple une couverture végétale importante). Ces échecs de positionnement sont facilement identifiables car aucune coordonnée ne leur est attribuée, contrairement aux imprécisions d'enregistrement qui sont associées à des coordonnées spatiales inexactes. Les échecs entraînent des modifications dans la fréquence temporelle des localisations, comme illustré en Figure III.1.

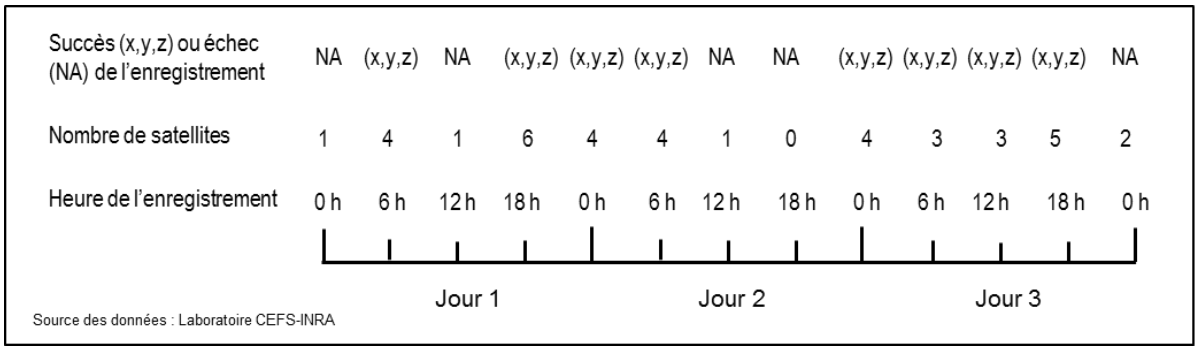


Figure III.1. Extrait de localisations de chevreuils enregistrées par GPS : succès et échecs de positionnement, nombre de satellites et fréquence temporelle. Lorsque le nombre de satellites est inférieur à 2, il n'y a pas d'enregistrement.

Seules les données sur les chevreuils d'Aurignac sont complètes et indiquent également les localisations dont le positionnement a échoué. Sur l'ensemble des localisations (un peu plus de 318 000), le pourcentage d'échec est d'environ 8 %, avec une variation selon les individus entre 1 % et 24 %. Afin de cartographier les localisations, nous sélectionnons les données valides. Nous conservons également les lignes d'enregistrements nuls afin de conserver l'information sur les

[2] Le logiciel est disponible à partir de l'adresse : [http://geodesie.ign.fr/].

déplacements notamment sur des intervalles de temps restant identiques. Pour les données sur les renards et sur les cervidés dans les Vosges, les intervalles de temps peuvent être irréguliers du fait des données non enregistrées. L'information temporelle doit donc toujours être associée aux coordonnées spatiales.

Le DOP et le PDOP indiquent la qualité des enregistrements en prenant en compte la configuration des satellites (partie I-2.3.1). Le DOP est un rapport entre l'écart-type de la position et l'écart-type des données connues sur la configuration des satellites (Langley, 1999). Plus les satellites sont éloignés et bien répartis autour du point mesuré, meilleure est la précision des coordonnées calculées. Une valeur de DOP de 1 signifie une précision exacte théorique. Il est généralement considéré que les valeurs de DOP comprises entre 1 et 5 indiquent une bonne précision. Le Tableau III.1 résume les nombres de satellites et les valeurs du DOP et du PDOP selon les informations disponibles pour les 4 cas d'étude utilisant la technique GPS. Pour l'ensemble des mesures par cas d'étude, les moyennes des valeurs de DOP varient peu, entre 4,3 et 4,6. Le nombre de satellites se situe en moyenne autour de 5, et varie entre 2 et 12. Les valeurs du DOP sur les échantillons de Nancy et des Vosges sont comprises globalement entre 0 et 10, 10 étant la valeur maximale de sélection des localisations par les écologues ayant étudié ces cas. La précision des coordonnées en planimétrie est alors considérée comme inférieure à 20 m. Pour le cas d'étude des chevreuils à Aurignac, les enregistrements de coordonnées correspondent à des PDOP inférieurs à 25. Les imprécisions des coordonnées peuvent par contre être associées aux valeurs de PDOP les plus élevées. Les échecs de positionnement sans aucun enregistrement n'ont soit aucun PDOP calculé, soit ils sont associés à une grande valeur autour de 50. Le nombre de satellites captés lors des échecs peut être élevé, jusqu'à 11, mais la moyenne se situe autour de 2.

Tableau III.1. Le nombre de satellites, les valeurs de DOP ou de PDOP selon les cas d'étude : moyennes et écarts-types par cas d'étude utilisant des colliers GPS.

	Moyenne par individu				Écart-type moyen par individu			
Variables	Renard, Nancy	Chevreuil, Vosges	Cerf, Vosges	Chevreuil, Haute-Garonne	Renard, Nancy	Chevreuil, Vosges	Cerf, Vosges	Chevreuil, Haute-Garonne
Nombre de satellites	5 *(données disponibles pour 2 individus sur 4)*	5	5	5 *(en prenant en compte les échecs : 5)*	1 *(données disponibles pour 2 individus sur 4)*	1	1	1 *(en prenant en compte les échecs : 2)*
DOP	4,6	4,3	4,6		2,3	1,9	2,5	
PDOP				5,0				3,8

Nous choisissons de ne pas supprimer a priori les localisations en fonction des indications sur la précision comme le nombre de satellites ou les valeurs du DOP. Une sélection peut en effet entraîner des biais dans l'analyse de données. En supprimant les localisations associées à des estimations de mauvaise précision (grand DOP par exemple), il est possible de supprimer davantage de localisations en milieu fermé ou en zone de relief. Cela peut entraîner une sous-estimation des localisations par rapport aux types d'éléments du paysage dans le voisinage des animaux. Certaines coordonnées apparaissent cependant comme aberrantes car trop éloignées des localisations antérieures et postérieures pour l'intervalle de temps correspondant. Nous reviendrons dans la partie III-3.2 sur les critères d'identification des localisations aberrantes : par estimation des vitesses et par prise en compte des données géographiques.

Manipulation des données

La mise en œuvre des traitements sur les données s'effectue via l'implémentation de méthodes ad hoc ou l'utilisation de fonctions SIG et de logiciels de statistiques. Afin d'étudier les données de localisations, et par la suite les relations entre ces localisations, les trajectoires interpolées et les données géographiques, nous avons implémenté des méthodes de visualisation et d'analyse dans un module informatique. L'intérêt de disposer d'un module commun de développement est de pouvoir s'appuyer sur des bibliothèques existantes. Dans notre démarche, les données de localisations ainsi que les données géographiques sont cartographiées. Une cartographie des résultats est également proposée. Les fonctionnalités d'analyse de données et de simulation sont aussi développées dans le même module à partir de la plateforme GeOxygene 3D (Brasebin, 2009).
Les logiciels SIG proposent des fonctions disponibles via une interface graphique ou via des lignes de commandes, utiles pour analyser des données géoréférencées. Des méthodes existantes sont notamment adaptées pour estimer les domaines vitaux, par interpolation d'un nuage de points ou par calcul de l'enveloppe convexe minimale. Les éditions des graphiques ont été effectuées soit grâce au logiciel R soit par des commandes Excel. Les illustrations sur la cartographie des données sont réalisées via l'interface de GeOxygene et via QGIS.

1.2. L'estimation des domaines vitaux et des espaces parcourus

Nous présentons les analyses des localisations des animaux sans intégrer les données géographiques. Nous nous intéressons à la détermination des domaines vitaux. Le domaine vital représente l'aire occupée par les animaux qui contient les ressources quotidiennes nécessaires. Il n'inclut a priori pas les régions parcourues exceptionnellement. Certaines séries de données dans les échantillons sont trop courtes, de un à quelques jours, afin de déterminer le domaine de vie. Nous parlons alors d'espace parcouru qui représente l'espace exploité et parcouru, même pendant une courte durée. Tous les cas d'étude sont ainsi concernés par l'estimation de l'espace parcouru, même s'ils correspondent à des spécifications d'enregistrements différentes.
Les domaines de vie des animaux sont liés aux déplacements. La superficie de ces domaines donne des indications sur les distances parcourues par les espèces selon leur rythme quotidien. Les déplacements peuvent être précisés par l'intensité plus ou moins grande de fréquentation des zones. Le cœur d'un domaine vital correspond à la zone dans laquelle l'individu se situe le plus souvent et qu'il exploite la majeure partie du temps pour ses activités quotidiennes (Hamann *et al.*, 2003). Les localisations en dehors du cœur peuvent être considérées comme faisant suite à des déplacements plus rares de type exploratoire ou à des déplacements exceptionnels comme lors d'une dispersion. Nous nous intéressons aux caractéristiques des domaines vitaux et en particulier dans cette partie, à l'estimation de leurs superficies. Nous élargissons la notion de domaine vital qui est généralement définie comme répondant aux besoins quotidiens des individus, à celle d'espace parcouru quelles que soient les activités et la durée. Nous présentons en Figure III.2, des exemples illustrant les différences possibles entre les espaces parcourus pendant des durées différentes.

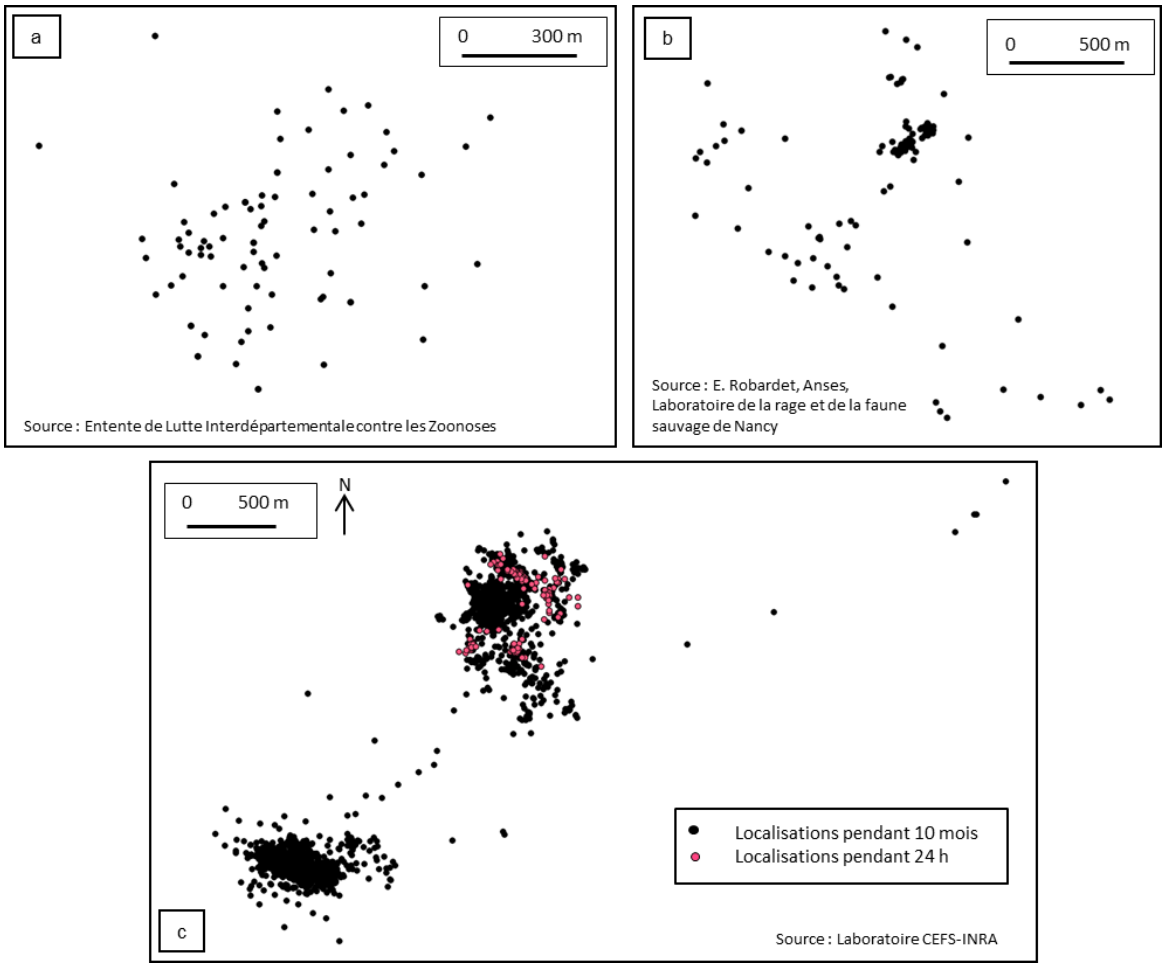


Figure III.2. L'espace parcouru par les animaux peut être estimé à partir de localisations de fréquences différentes. Exemples pour : les renards, a) les 84 localisations enregistrées pendant 6 mois permettent d'évaluer le domaine de vie, b) 193 localisations enregistrées pendant 24 heures couvrent un espace qui correspond à un rythme quotidien ; c) pour un chevreuil, les espaces pendant une durée de 10 mois s'approchent du domaine vital annuel. L'espace parcouru pendant une journée (extrait en rose) est logiquement plus petit que le domaine vital. Des déplacements exploratoires (par exemple vers l'est) ont lieu en dehors du domaine vital.

En Figure III.2.a, les localisations d'un renard enregistrées pendant 6 mois donnent une estimation de son domaine vital. En Figure III.2.b, les localisations d'un renard pendant une journée délimite ce que nous appelons un espace parcouru pendant cette même durée. La Figure III.2.c montre la différence pour un chevreuil, entre un domaine vital estimé pendant 10 mois divisé géographiquement en deux parties, et un espace parcouru pendant une journée selon un rythme quotidien. Pour ce chevreuil, on constate des déplacements en dehors du domaine de vie habituel : des localisations sont excentrées, ce qui correspond à des déplacements brefs mais qui sont pris en compte lors du calcul des superficies des espaces parcourus.

De manière générale, les déplacements recouvrent des espaces divers, soit parcourus habituellement soit ponctuellement explorés. Nous cherchons à caractériser la superficie de ces espaces. Pour commencer, nous synthétisons les résultats par espèce et par type d'espace étudié en nous appuyant sur le calcul des enveloppes convexes minimales des localisations. Ces résultats restent attachés aux cas d'étude. Des tendances peuvent toutefois être observées. Nous comparons ensuite cette méthode avec celle de l'interpolation par noyaux. Nous nous

intéressons ensuite aux différences entre les individus en ventilant les données selon les paramètres biologiques et contextuels des relevés.

1.2.1. Caractéristiques des espaces parcourus par espèce et par cas d'étude

Afin de comparer les superficies des espaces parcourus, nous utilisons dans un premier temps l'enveloppe convexe minimale des positions enregistrées. Cette méthode est généralement utilisée pour estimer les domaines de vie (Mulhauser & Zimmermann, 2008). Les valeurs calculées sont détaillées dans le Tableau III.2. Des informations sur le nombre de localisations associées ainsi que sur les durées des suivis sont indiquées. Nous avons observé que la justesse des estimations des domaines de vie est liée à ces deux paramètres. Dans notre étude, nous cherchons à préciser ce que nous appelons l'espace parcouru quelle que soit la durée, tout en gardant en mémoire qu'une longue durée permet d'estimer les domaines vitaux.

Tableau III.2. Estimation des superficies des espaces parcourus par calcul de l'enveloppe convexe minimale des localisations : moyennes et écarts-types par individu selon les cas d'étude. Les caractéristiques des relevés sont indiquées dans les colonnes de droite. Par exemple, pour le site d'Annemasse, les relevés concernent en moyenne par renard 21 jours différents répartis sur une durée totale de 278 jours.

Cas d'étude (nombre d'individus suivis)	Superficie de l'espace parcouru par individu en hectare		Nombre de relevés non nuls par individu	Nombre de jours distincts concernant les relevés par individu	Durée totale du suivi par individu, en nombre de jours
	moyenne	écart-type	moyenne	moyenne	moyenne
Renards, Annemasse (8)	109,4	55,4	72	21	278
Renards, Pontarlier (4)	82,2	71,9	44	17	215
Renards, Nancy (4)	96,3	53,1	169	1	6
Cerfs, Vosges (3)	252,9	94,8	847	4	164
Chevreuils, Vosges (3)	48,0	18,6	1334	5	206
Chevreuils, Aurignac (70)	2564,5	6009,4	3744	297	297

Le Tableau III.2 montre que la superficie de l'espace parcouru par les individus dépend de la durée de la période d'observation et de la fréquence des localisations. L'effet de la fréquence et de la durée est surtout observé pour les cervidés. Pour les chevreuils à Aurignac, l'ensemble des localisations est considéré, incluant ainsi des mouvements exploratoires et la définition de nouveaux domaines vitaux pendant l'année des suivis. Les superficies calculées sont très élevées, et ne correspondent donc pas à la définition du domaine vital d'un individu. Nous commentons ci-dessous les résultats plus précisément pour les renards dans les trois sites d'étude et pour les cervidés dans les Vosges. Les espaces parcourus dans les trois cas d'étude sur les renards ont une superficie moyenne par individu similaire malgré des protocoles de suivi différents. Pour les renards à Annemasse et à Pontarlier, les durées d'observation sont longues (plusieurs mois) et les fréquences de localisations petites (quelques points par journée de suivi). Les renards à Nancy sont suivis pendant une journée avec des fréquences de 15 minutes. Une fréquence élevée a tendance à prendre davantage en compte des déplacements d'excursion en dehors du cœur du domaine vital.

Les espaces parcourus par les renards en milieu périurbain

Les renards parcourent des espaces correspondant à des superficies de même ordre de grandeur en moyenne, de 82 ha (Pontarlier), 109 ha (Annemasse), et de 96 ha (Nancy). La superficie la plus petite pour un individu est estimée à 25 ha, et la plus grande à 230 ha. Pour les cas d'étude à Annemasse et à Pontarlier, les localisations concernent plusieurs journées, ce qui permet une prise en compte de l'espace parcouru pendant une longue durée. À Nancy, il s'agit de l'espace parcouru au cours de 24 heures, ce qui correspond à un rythme quotidien. Les résultats pour les deux durées de suivi, sur une journée ou sur plusieurs jours, aboutissent à des surfaces parcourues de même ordre de grandeur.

Le suivi pendant une journée permet de distinguer les différences de fréquentation entre la période diurne et la période nocturne. Dans le milieu périurbain autour de Nancy, les renards sont actifs et se déplacent principalement la nuit. Ce rythme est visible par les localisations qui concernent des espaces beaucoup plus grands la nuit que le jour. La durée d'une journée ne correspond cependant pas à la totalité des lieux que le renard exploite habituellement lors de ses déplacements. Nous pouvons considérer que nous ne connaissons dans ce cas d'étude qu'une partie des domaines vitaux des individus.

La durée de plusieurs jours de suivi fait apparaître plusieurs lieux explorés. La connaissance des déplacements n'est pas aussi exhaustive que pour les suivis d'une journée car les fréquences temporelles sont moins élevées. Cela peut entraîner une sous-estimation des superficies des espaces parcourus. L'estimation de l'espace parcouru correspond toutefois mieux à la définition du domaine vital qui couvre les lieux utilisés habituellement par les animaux. Nous avons testé la stabilité de l'estimation par enveloppe convexe minimale du domaine vital d'un renard à Pontarlier. L'enveloppe convexe est calculée pour un nombre croissant de jours différents de suivis (Figure III.3). Une stabilité est constatée à partir de 15 jours de suivi, la surface ne variant que de 84,6 ha pour 15 jours à 88,8 ha pour 35 jours.

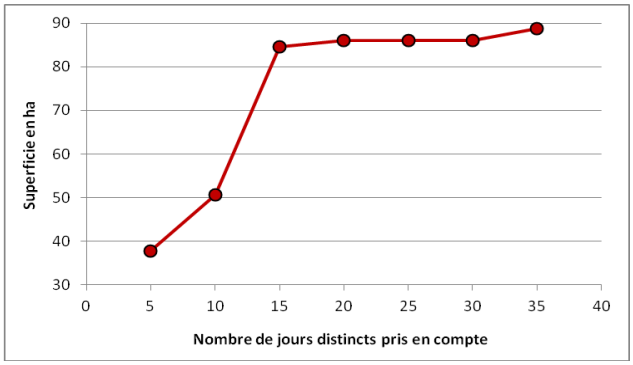


Figure III.3. Étude de la stabilité de l'estimation du domaine vital en superficie selon le nombre de jours distincts considérés.

La variation dans l'estimation des espaces parcourus par les renards entre les trois cas d'étude peut donc venir de la différence de spécification des suivis (fréquence et durée des relevés). D'autres facteurs interviennent également :

- le nombre d'individus par cas d'étude ;
- les comportements individuels ;
- les caractéristiques des renards : les nombres d'individus suivis sont faibles mais nous avons quand même pris en compte l'âge et le sexe du renard dans l'interprétation des déplacements. Nous n'avons cependant pas noté de différences entre les espaces parcourus selon ces facteurs ;

- les caractéristiques des sites d'étude : les périphéries des trois villes étudiées parcourues par les renards correspondent à un taux d'urbanisation différent. La périphérie de Pontarlier est peu urbanisée, celle d'Annemasse puis celle de Nancy relativement plus.

Les cervidés dans les Vosges

Entre les deux espèces de cervidés sur le site d'étude de La Petite Pierre, les surfaces parcourues estimées sont 5 fois plus grandes pour les cerfs que pour les chevreuils. Un exemple sur un chevreuil et un cerf est illustré en Figure III.4 à partir de l'ensemble des localisations par individu sur plusieurs jours. Le rapport entre les surfaces est de l'ordre de 5 : 267 ha pour le cerf à partir de localisations enregistrées pendant 3 jours, et 52 ha pour le chevreuil à partir de localisations enregistrées pendant 5 jours.

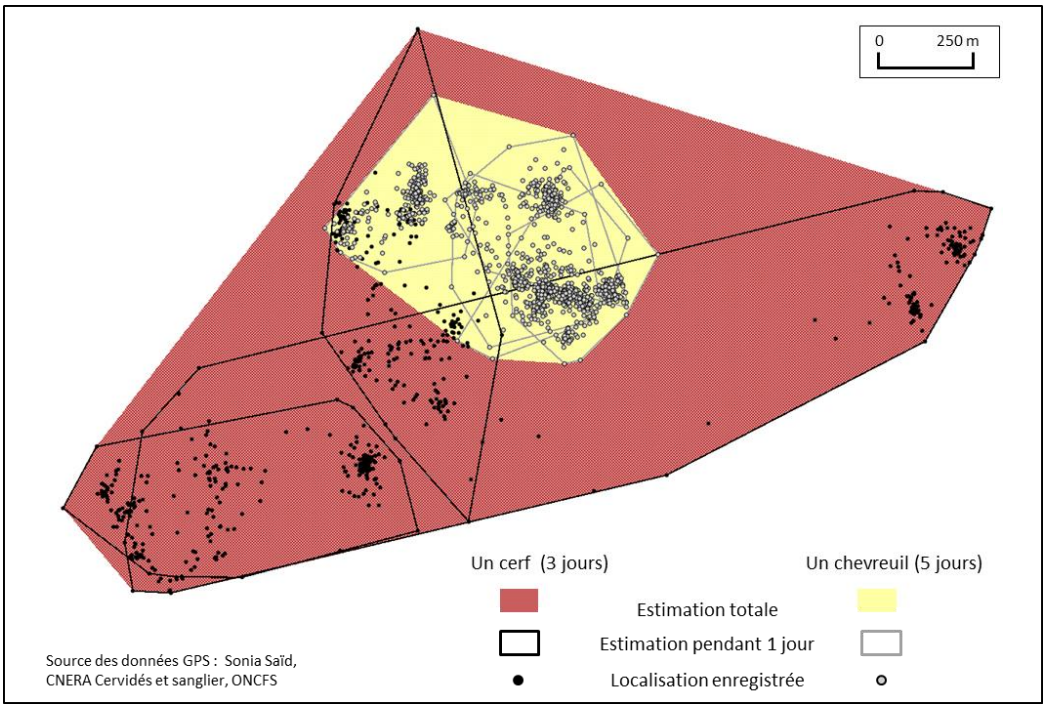


Figure III.4. Espaces parcourus estimés par enveloppe convexe minimale, pour un cerf et pour un chevreuil dans les Vosges.

La Figure III.4 illustre le détail de l'espace parcouru par jour. Les spécifications de relevés sont similaires et davantage comparables qu'entre les cas d'étude des renards. L'estimation s'appuie sur des relevés de fréquence élevée et couvrant plusieurs journées. Ceci permet à la fois une bonne connaissance des déplacements journaliers et une identification des différents lieux parcourus. Parmi les cas d'étude (sur les renards et les cervidés), les chevreuils dans les Vosges sont ceux qui semblent se déplacer sur les espaces les plus restreints. Lorsque l'on compare les déplacements enregistrés pendant un ou quelques jours et que l'on ne prend pas en compte le suivi des chevreuils à Aurignac, le cerf apparaît comme l'espèce occupant les espaces les plus larges.

Les chevreuils dans le canton d'Aurignac, en comparaison avec les chevreuils suivis dans les Vosges

Les superficies des espaces parcourus par les individus à Aurignac sont très largement supérieures aux autres cas d'étude, espèces et secteurs confondus. Les superficies sont estimées 50 fois plus grandes que pour les chevreuils dans les Vosges. L'explication d'une telle différence

vient d'abord de la durée du suivi plus longue pour les chevreuils à Aurignac. Le calcul des enveloppes convexes minimales est effectué à partir de l'ensemble des points GPS enregistrés pour un individu, généralement sur une dizaine de mois avec des relevés programmés au minimum quatre fois par jour. Si l'on revient à des durées équivalentes, les surfaces sont du même ordre de grandeur. Nous n'avons pas effectué un calcul pour tous les individus à Aurignac. À titre d'exemple, la surface moyenne parcourue par un chevreuil adulte à Aurignac est de 23 ha par jour pendant 6 jours distincts, et par un chevreuil dans les Vosges de 12 ha. Ces surfaces sont davantage du même ordre de grandeur que si l'on considère des durées de suivi différentes. Certaines localisations ont été supprimées pour les calculs à Aurignac : celles sans coordonnées et celles apparaissant comme aberrantes suite à une visualisation cartographique. Les localisations supprimées présentent des distances trop importantes au vu des intervalles de temps correspondant. Elles sont éloignées et isolées par rapport au reste des localisations. Leur suppression permet de restreindre la surestimation des espaces parcourus. Tous les points aberrants n'ont pas été identifiés mais ces derniers restent à l'intérieur ou à proximité de l'emprise des autres localisations. Les espaces parcourus peuvent donc être un peu surestimés. Les grandes surfaces parcourues à Aurignac sont également liées au fait que des déplacements en dehors des domaines vitaux sont pris en compte dans l'estimation des espaces parcourus.

Synthèse des espaces parcourus

Nous avons vu que les espaces parcourus peuvent correspondre plus ou moins à la définition du domaine vital qui est utilisé habituellement. Dans les cas d'étude, certains espaces parcourus estimés correspondent aux activités d'une seule journée (renards à Nancy), alors que d'autres couvrent des rythmes annuels (chevreuils à Aurignac). Les variations entre les individus peuvent aussi être importantes au sein d'une même espèce et d'un même cas d'étude. Par exemple pour les renards à Annemasse, l'écart-type des surfaces des espaces parcourus entre les individus est de 55 ha pour une moyenne de 109 ha. Les écarts-types entre les surfaces parcourues par les individus d'une même espèce augmentent avec la valeur des moyennes des surfaces estimées : pour les cerfs, l'écart-type est de 95 ha pour une moyenne de 253 ha. L'écart-type entre les individus est le plus faible pour les chevreuils dans les Vosges et le plus élevé pour les chevreuils à Aurignac. Nous abordons par la suite les facteurs de différenciation entre les espaces parcourus.

1.2.2. Comparaison des estimations des espaces parcourus selon deux méthodes

La superficie des espaces parcourus peut être surestimée avec la méthode de l'enveloppe convexe minimale. Nous souhaitons préciser l'emprise de ces espaces en utilisant une autre méthode d'interpolation qui agrège des enveloppes convexes locales. Cette méthode nommée LoCoH est décrite dans Getz *et al.* (2007). Elle correspond à une méthode d'interpolation par noyau non paramétrique, c'est-à-dire qui ne prend en compte que l'emplacement des localisations. Nous avons comparé les résultats de cette méthode pour les cas d'étude des renards à Pontarlier et à Nancy, comme illustrée en Figure III.5 pour un individu.

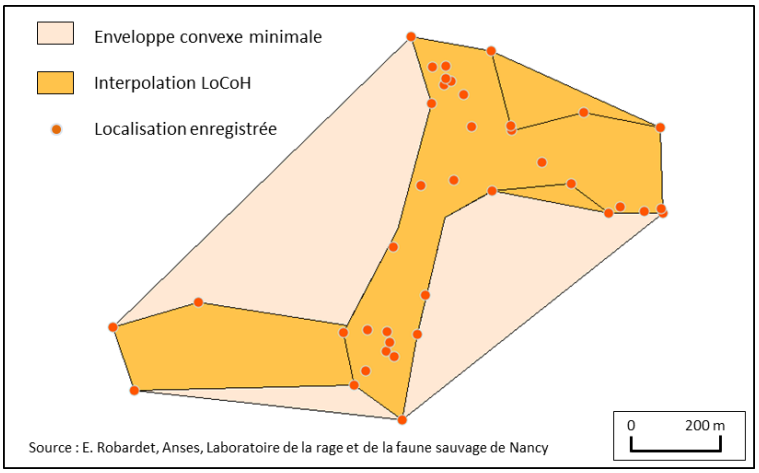


Figure III.5. Comparaison de l'espace parcouru par un renard pendant 12 heures entre l'estimation par l'enveloppe convexe minimale et l'estimation par LoCoH comprenant 100 % des localisations.

La méthode LoCoH est lancée à partir du plugin HoRAE dans le logiciel OpenJUMP (Steiniger & Hunter, 2013). Elle est utilisée pour l'estimation des domaines vitaux en prenant en compte la distribution des points. Cette estimation peut être calculée selon des pourcentages différents d'inclusion des points. Par exemple, une estimation à 95 % signifie que 5 % des localisations ne sont pas prises en compte lors du calcul des enveloppes car ces localisations sont trop éloignées des autres. Le Tableau III.3 compare les superficies estimées par individu avec la méthode de l'enveloppe convexe et avec LoCoH. Le premier cas d'étude pris en compte est celui des renards à Nancy suivis pour des durées d'une ou deux journées. Le second cas est celui des renards à Pontarlier suivis entre 5 et 35 journées différentes. Ces données sur plusieurs journées correspondent davantage aux critères requis pour estimer le domaine vital. Les localisations du renard 4 sont celles illustrées en Figure III.2.b et celles du renard 5 en Figure III.2.a.

Tableau III.3. Estimation de l'espace parcouru par deux méthodes : enveloppe convexe minimale et LoCoH. La méthode LoCoH permet de différencier la fréquentation des zones en n'incluant dans la superficie calculée qu'un pourcentage des localisations totales, par exemple 90 % ou 50 %.

Site d'étude	Renard	Nombre de jours distincts de suivi	Superficie en hectare				Rapport de différence : la surface par LoCoH à 100 % divisée par la surface de l'enveloppe convexe minimale
			Méthode enveloppe convexe	Méthode LoCoH à 100 %	Méthode LoCoH à 90 %	Méthode LoCoH à 50 %	
Nancy	1	1	73,9	35,0	21,6	9,1	0,47
Nancy	2	1	148,9	88,5	1,3	0,1	0,59
Nancy	3	1	52,8	25,0	8,0	0,5	0,47
Nancy	4	1	169,6	114,1	14,3	0,1	0,67
Pontarlier	5	35	88,8	84,7	33,6	8,4	0,95
Pontarlier	6	12	18,2	17,6	9,6	3,1	0,97
Pontarlier	7	14	24,5	21,8	16,4	7,4	0,89
Pontarlier	8	5	197,1	167,4	100,3	16,7	0,85

Les rapports de surfaces entre les deux méthodes s'échelonnent entre 0,47 et 0,97. Les différences entre les résultats sont plus importantes lorsque la durée d'observation est courte (cas de Nancy). Les surfaces estimées par les deux méthodes ont par contre des valeurs proches

lorsque les durées de suivi s'étalent sur plusieurs jours (cas de Pontarlier). Cela signifie que les domaines vitaux estimés par enveloppe convexe pendant plusieurs jours sont parcourus dans leur intégralité. Les localisations sont réparties sur l'ensemble de l'espace parcouru. Les espaces parcourus pendant une journée correspondent à une partie du domaine vital : les localisations sont moins regroupées spatialement. L'enveloppe convexe minimale surestime l'espace parcouru pendant une seule journée par rapport à la méthode LoCoH. Concernant les suivis sur plusieurs journées, les deux méthodes donnent des résultats similaires.
Dans le Tableau III.3, nous avons indiqué les surfaces estimées par LoCoH paramétrée pour ne conserver que 50 % des localisations. Ce pourcentage est généralement utilisé afin d'estimer le cœur du domaine vital (Marchandeau *et al.*, 2007). Il est faible pour les déplacements quotidiens, en moyenne autour de 7 % de la surface totale, et plus élevé pour les localisations sur plusieurs jours, autour de 18 % de la surface totale. Cela signifie que dans le cas des espaces parcourus pendant une journée à Nancy, les localisations sont très concentrées autour de lieux précis comme un gîte de repos. Les déplacements sur de longues distances sont uniques et ils ne passent généralement pas au même endroit. Les suivis sur plusieurs jours permettent de couvrir plusieurs lieux fréquemment utilisés, par exemple plusieurs gîtes de repos. Les pourcentages de 95 % ou 90 % peuvent être utilisés afin d'estimer l'aire d'activité des animaux. Cette aire est intéressante afin de supprimer les déplacements d'exploration en dehors de l'espace le plus fréquemment parcouru. L'aire d'activité représente environ 27 % de la surface totale dans le cas de Nancy et 57 % dans le cas de Pontarlier. Ces résultats sont cohérents avec le fait que les localisations sont davantage regroupées si elles sont enregistrées sur des longues durées.
L'estimation par les deux méthodes montre que les localisations enregistrées pendant de longues durées sont plus regroupées que pendant une seule journée. Cela correspond à la définition du domaine vital d'un individu qui est estimé sur plusieurs jours et qui couvre les lieux les plus fréquemment exploités. Que ce soit dans le domaine vital ou dans l'espace parcouru pendant une journée, des différences de fréquentations sont observées : des lieux sont très utilisés et d'autres sont uniquement explorés et traversés.

1.2.3. Étude des différences interindividuelles

Le premier facteur influençant l'estimation des espaces parcourus individuels est la période de suivis allant d'une journée à deux années par individu. Nous nous intéressons aux autres facteurs pouvant être à l'origine des différences entre les espaces parcourus. Ces facteurs sont :

- les individus et leurs caractéristiques, comme leur âge ;
- l'année de suivi : ce facteur influence les conditions environnementales et la disponibilité des ressources ;
- la journée de suivi : elle correspond à une saison particulière et à une période dans le cycle biologique de l'animal ;
- l'évolution dans le temps lorsqu'un individu est suivi sur plusieurs années, ce qui est lié à son âge.

Nous nous concentrons dans cette partie aux différences au sein des cervidés dans les Vosges et à Aurignac.

Les cervidés dans les Vosges

Concernant le cas des Vosges, les journées de suivi sont réparties entre mi-mars et début décembre, avec une majorité en été. Les localisations des 3 chevreuils (chevrettes) et de 2 cerfs (biches) concernent entre 3 et 6 journées différentes, dont 5 sont identiques. Nous avons représenté en Figure III.6 les surfaces des enveloppes convexes minimales de ces 5 individus.

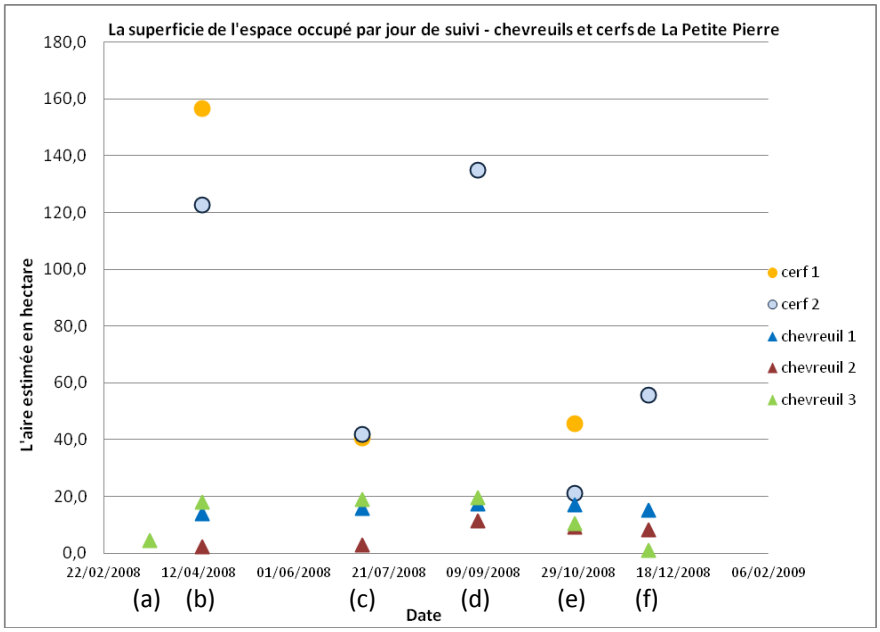


Figure III.6. Comparaison interindividuelle et en fonction de la date de suivi de la superficie des espaces parcourus par les chevreuils et les cerfs dans les Vosges.

Les espaces parcourus sont, comme indiqué auparavant, plus étendus et avec des différences interindividuelles et inter-dates plus grandes pour les cerfs que pour les chevreuils. Les surfaces sont plus importantes pour les 3 chevreuils pendant les journées à la fin de l'été (d) et à l'automne (e). Elles sont variables entre les individus aux autres saisons. Pour les différentes journées, les superficies parcourues varient pour un même chevreuil avec des écarts-types compris entre 2 ha et 7 ha pour des espaces parcourus entre 7 ha et 16 ha par jour. Le chevreuil 2 se distingue car il parcourt un espace plus petit, en moyenne moitié moins que les deux autres chevreuils. Pour les 2 cerfs, les espaces parcourus peuvent être très étendus, par exemple pour la journée au début du printemps (b). Pour les journées en été (c) et en automne (e), les superficies sont plus faibles. On remarque pour le cerf 2 suivi en septembre (d) que l'espace parcouru à cette période est également importante. Les tendances selon les saisons sont difficiles à confirmer. La distinction entre les individus permet toutefois de mettre en évidence la variation entre les espaces parcourus par jour. Les éléments contextuels liés à la saison peuvent par exemple jouer un rôle sur les espaces parcourus :

- le cycle reproductif : la période de naissance des jeunes a lieu pour les deux espèces entre avril et juin. S'en suit l'élevage des jeunes qui peuvent restreindre les déplacements des chevrettes et des biches. Cela explique peut-être les déplacements plus longs début avril (b) pour les 2 biches ;

- la disponibilité des ressources alimentaires : en hiver, les ressources sont moins nombreuses et diversifiées, ce qui peut amener les animaux à se déplacer davantage (Náhlik *et al.*, 2009). Dans Richard *et al.* (2011) qui concernent l'étude des cerfs et des chevreuils à La Petite Pierre, les domaines vitaux des deux espèces sont estimés plus importants pendant la saison hivernale que pendant le reste de l'année. De plus, les domaines vitaux des cerfs sont différents si l'on considère la nuit ou la journée (plus étendus pendant la journée). Les domaines vitaux des chevreuils sont associés à une plus grande variabilité pendant la saison estivale. Nous ne pouvons constater ces résultats par nos analyses. Nous pouvons juste suggérer que selon les journées de suivi, les animaux effectuent un compromis entre des déplacements longs pour chercher de la nourriture et des déplacements courts limitant les dépenses d'énergie.

Les chevreuils à Aurignac

Le cas d'étude des chevreuils à Aurignac concerne plusieurs classes d'âge. Nous constatons que l'espace parcouru estimé selon l'enveloppe convexe minimale est en moyenne plus grand pour les yearlings (environ 4500 ha), puis pour les jeunes (3600 ha) et pour les adultes (600 ha). Ces résultats doivent être pondérés car le nombre d'individus dans chaque classe d'âges n'est pas le même, respectivement 8, 38 et 24. 65 % des individus suivis sont des jeunes ou des yearlings. Les différences entre les classes d'âge sont vraisemblablement la conséquence des déplacements de type excursion, pouvant être des dispersions définitives ou des explorations. Ces déplacements s'étendent sur des distances allant jusqu'à plusieurs kilomètres et concernent des lieux parcourus une seule fois en dehors du domaine vital. Les individus jusqu'à 2 ans (jeunes et yearling) sont amenés à se déplacer sur de longues distances à la recherche d'un nouveau domaine de vie. Dans les observations de l'INRA, ces distances vont jusqu'à 50 km, mais sont plutôt de l'ordre de 5 km. Les adultes peuvent effectuer des excursions en dehors de leur domaine de vie en période de reproduction, sur plusieurs kilomètres (Mysterud, 1999). La Figure III.7 illustre les localisations d'un jeune mâle en 2008 suivi ensuite en tant qu'adulte en 2010. D'une année sur l'autre, l'espace parcouru estimé par enveloppe convexe passe de 2 530 ha à 128 ha. Dans ce cas, l'individu s'est stabilisé près de l'espace qu'il avait parcouru étant jeune, même s'il a effectué des déplacements exploratoires peut-être en vue de trouver un nouvel espace vital.

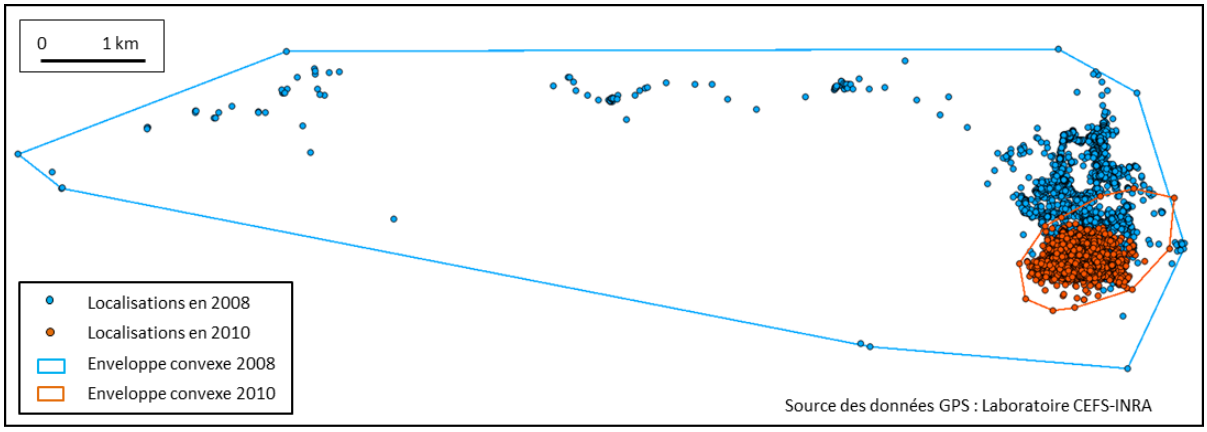


Figure III.7. Les données de localisations concernent un même individu né en 2007, suivi en 2008 en tant que jeune et en 2010 en tant qu'adulte. L'espace parcouru diminue entre ces deux années.

Les adultes peuvent avoir des déplacements de dispersion mais ceux-ci sont plus limités dans le temps et dans l'espace. Ces déplacements sont observés pour les individus suivis sur plusieurs années et passant d'une classe d'âge à l'autre. Pour les mêmes individus, l'année de suivi en tant que jeune ou yearling correspond à des espaces parcourus plus grands que pour l'année de suivi en tant qu'adulte. On constate que les yearlings qui avaient été suivis en tant que jeunes parcourent des espaces qui ont tendance à diminuer, contrairement aux valeurs moyennes par classe d'âge. Cela confirme la nécessité de prendre en compte les comportements individuels. La moyenne pour la classe d'âge des yearlings concerne peu d'individus et subit l'effet d'un individu qui parcourt un espace très large. La distinction entre femelles (environ 2700 ha pour 42 individus) et mâles (2750 ha pour 35 individus) est faible. Les différences interindividuelles s'observent en majorité en fonction des classes d'âge et des types de déplacements qui leur correspondent.

L'estimation de l'espace parcouru est un indicateur des déplacements effectués par les animaux. Nous avons vu que cet espace se superpose avec le domaine de vie lorsque les durées de suivi concernent plusieurs jours. Les suivis effectués pendant moins de 5 journées (renards à Nancy et cervidés dans les Vosges) sont intéressants pour étudier l'espace tel qu'il est exploité dans un rythme quotidien. Au-delà des spécifications différentes des données, les espèces montrent des utilisations particulières de l'espace. Si l'on se restreint aux espaces parcourus pendant une journée, nous pouvons supposer d'après nos analyses que ces espaces ont une surface qui décroit du cerf au renard, puis au chevreuil. Il est à présent intéressant de détailler les déplacements correspondant aux localisations enregistrées. Les différences des espaces parcourus entre espèces et entre individus sont à enrichir avec les trajets linéaires estimés. Les facteurs explicatifs des différences entre les cas d'étude ont été listés et sont repris afin de chercher à identifier les types et les rythmes de déplacements.

1.3. Construction des trajectoires linéaires et description géométrique

Pour l'étude des trajets de déplacement, une interpolation entre les localisations est effectuées afin d'obtenir une trajectoire continue. Seuls les cas d'étude concernant des enregistrements séparés par des intervalles de temps courts sont conservés afin de limiter les erreurs d'interpolation entre deux localisations connues. Nous n'étudions pas dans cette partie le cas d'étude des renards à Annemasse et à Pontarlier. Nous utilisons les trajectoires pour caractériser la forme et le rythme des déplacements.

1.3.1. Interpolation des localisations en trajectoires

Nous nous intéressons à la connaissance des déplacements à partir des localisations. L'interpolation des localisations en trace (ou trajectoire) linéaire est pertinente lorsque les fréquences temporelles sont élevées et régulières. Nous proposons d'interpoler linéairement les déplacements afin de représenter la chronologie des localisations et leur topologie. Par la suite, nous utiliserons le mot de trace pour l'objet linéaire continu qui est obtenu par interpolation des localisations. Le terme trajectoire est plutôt consacré pour cette trace renseignée – avec les coordonnées spatiales et temporelles – et caractérisée en fonction des distances parcourues et des durées correspondantes.
La trace linéaire constitue un objet de travail intéressant afin d'étudier la dynamique des déplacements. Elle n'introduit pas de biais a priori sur des choix de déplacements en fonction des éléments du paysage. L'interpolation est uniquement effectuée pour les données issues de GPS qui sont associées à des intervalles de temps relativement courts, entre 5 min et 6 h, et à une régularité des enregistrements. Les cas d'étude concernés sont ceux sur les trois espèces, à Nancy, dans les Vosges et à Aurignac. Les enregistrements nuls peuvent être pris en compte différemment. Nous relions dans un premier temps les localisations associées à des coordonnées en conservant l'information temporelle. Cette méthode permet une approximation de chemins continus. Dans certaines analyses, il est pertinent de n'interpoler qu'entre les localisations à intervalles de temps égaux. La différence entre les deux types d'interpolation peut être importante localement, comme illustré en Figure III.8.

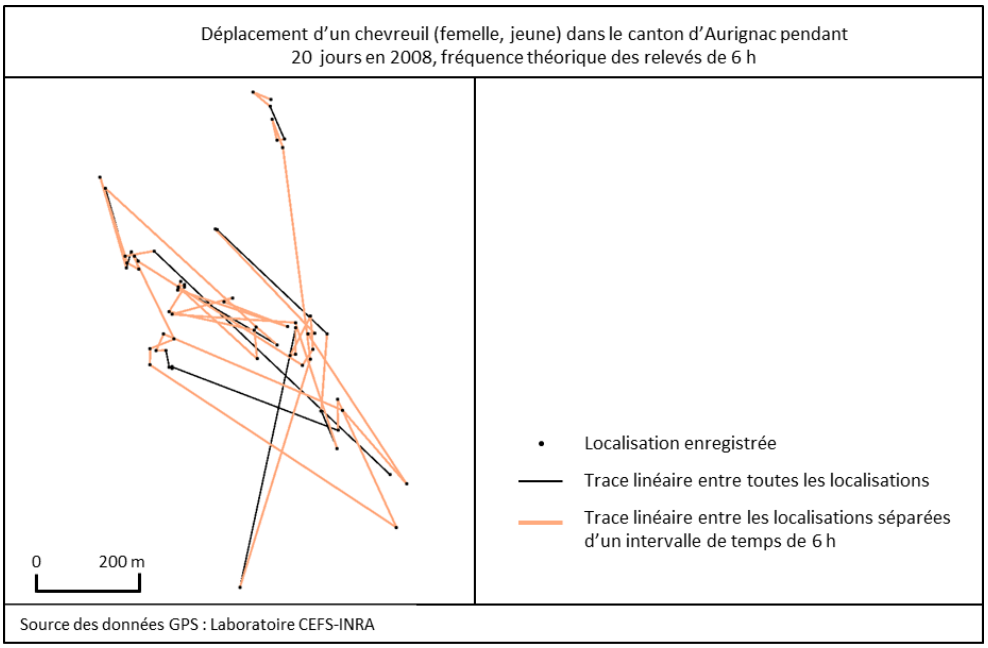


Figure III.8. Prise en compte des échecs d'enregistrement lors de l'interpolation linéaire des localisations. La trace est soit construite de manière continue en conservant l'indication des durées potentiellement différentes entre les localisations, soit construite de manière discontinue à partir des localisations séparées de 6 heures.

En fonction des échecs d'enregistrements, la trace créée est plus ou moins partielle et représentative des déplacements. Cette trace partielle est celle utilisée lors des comparaisons de distances et non des vitesses. Dans l'exemple de la Figure III.8, les relevés concernent un chevreuil suivi pendant 20 jours. Le nombre de localisations sans échec est de 63, par rapport à 77 en théorie toutes les 6 heures. La trace continue contient alors 62 segments. La trace discontinue et d'intervalle de temps égaux de 6 h en contient 51. Nous nous appuyons sur les traces interpolées pour la caractérisation de la forme et des rythmes des déplacements en fonction des espèces animales.

1.3.2. Calcul d'indices de description de la géométrie des trajectoires

Des comportements de déplacement peuvent être déduits à partir des trajectoires linéaires. Nous caractérisons la géométrie des traces par les distances parcourues estimées et les angles de direction. Ces calculs sont interprétés en prenant en compte les intervalles de temps.

Distances et espaces parcourus par les chevreuils à Aurignac

Nous avons cherché si des correspondances existaient entre les distances calculées à partir des traces reconstruites et l'estimation de l'espace parcouru par l'enveloppe convexe. La Figure III.9 représente la somme des distances parcourues en fonction de la superficie des espaces parcourus. La recherche de relations est effectuée sur l'échantillon de 24 chevreuils suivis en 2008 à Aurignac.

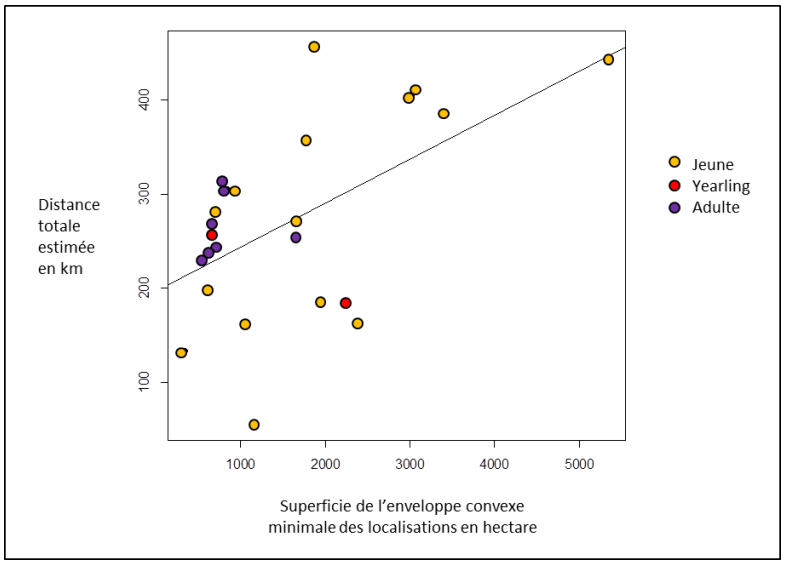


Figure III.9. Les distances estimées parcourues par 24 chevreuils sur le site d'Aurignac en 2008 en fonction de la superficie de l'enveloppe convexe minimale des localisations. La droite a pour coefficient directeur le coefficient de corrélation de Bravais-Pearson égal à 0,55.

À l'exception de trois individus suivis pendant moins de 200 jours, les durées sont similaires, autour de 330 journées. Il n'y pas de relation entre la durée de suivi et les valeurs de distances estimées. Le coefficient de corrélation de Bravais-Pearson[3] entre les superficies parcourues et les distances pour la durée de suivi propre à chaque individu est égal à 0,55. La significativité de cette valeur est de 95 %. De manière générale, les distances totales augmentent avec la superficie des espaces parcourus, mais nous pouvons caractériser différents types de relations entre ces deux variables. Certains chevreuils parcourent de grandes surfaces mais sur une distance totale relativement faible. Ces chevreuils effectuent en fait des déplacements de dispersion marqués et ils se déplacent habituellement sur de petites distances sauf lors de déplacements exceptionnels. Inversement, d'autres chevreuils se déplacent sur de petites surfaces mais ont des distances totales élevées : l'espace de vie est compact mais parcouru intensément. Les trajets quotidiens s'effectuent sur des distances relativement grandes. Il n'y a pas de déplacement de dispersion sur des distances de plus de quelques kilomètres. Dans ce cas, l'enveloppe convexe minimale surestime peu l'espace parcouru et cet espace parcouru se rapproche de la définition du domaine vital. Les corrélations positives entre les surfaces des espaces parcourus et les distances totales correspondent à deux comportements : celui des chevreuils qui ont des distances parcourues faibles associées à un espace peu étendu, et celui des chevreuils qui ont des distances élevées associées à des espaces larges et qui sont des individus avec une dispersion importante et des parcours quotidiens étendus. La classe d'âge est un facteur qui influence surtout la diversité des profils de déplacements entre les individus. Les jeunes ont des profils de déplacements variés : aussi bien au niveau des distances parcourues que de la surface des espaces parcourus. Deux individus yearling sont présents dans l'échantillon de 2008, ce qui ne permet pas de conclusion. Les adultes sont associés à des distances et à des espaces parcourus similaires entre les individus.

[3] Le coefficient de corrélation de Bravais-Pearson mesure la relation entre deux variables quantitatives. Si le coefficient est proche de 0, la relation est faible. S'il est proche de 1 ou de -1, la corrélation peut être respectivement interprétée comme positive ou négative. Le seuil de significativité associé permet de rejeter ou non l'hypothèse nulle selon laquelle la relation entre les deux variables est aléatoire.

Vitesses et angles de déplacements des renards à Nancy et des cervidés dans les Vosges

Pour étudier les trajets parcourus par les différentes espèces, nous avons choisi de comparer les vitesses qui pondèrent les distances avec les durées correspondantes. Les vitesses estimées permettent d'intégrer les irrégularités des intervalles temporels des relevés. Il s'agit cependant d'estimations. Plus l'intervalle de temps entre deux localisations successives est grand, plus la vitesse estimée aura tendance à être basse. La Figure III.10 montre les distributions des vitesses pour les trois espèces : les renards à Nancy, les chevreuils et les cerfs dans les Vosges. Pour les renards, les intervalles de temps sont majoritairement de 5 min avec quelques intervalles allant jusqu'à 1 heure ; pour les chevreuils et les cerfs, les intervalles sont en majorité de 5 min et de 15 min. Ces intervalles de temps qui sont pour la plupart courts nous permettent de s'approcher des vitesses moyennes réelles.

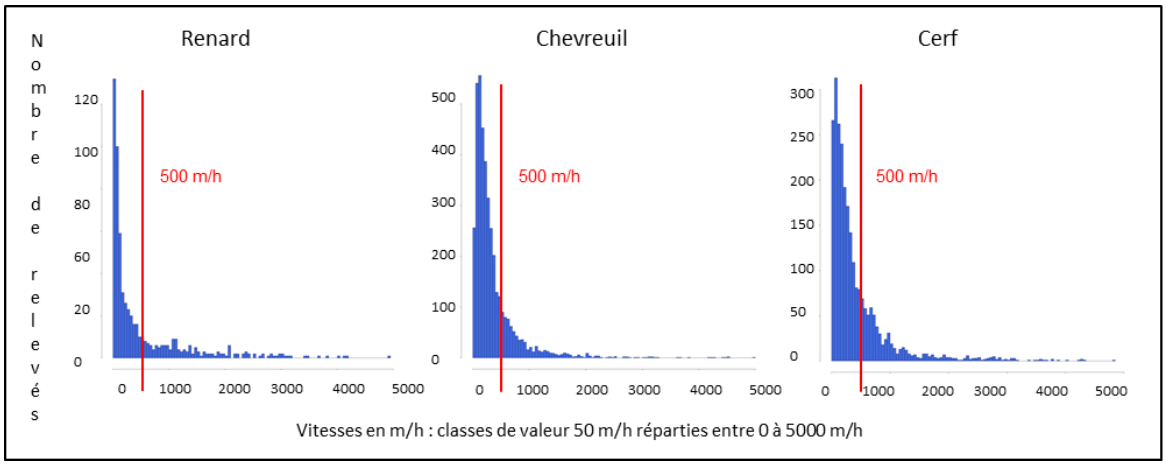


Figure III.10. Les distributions des vitesses des 3 espèces étudiées. L'ensemble des relevés de tous les individus sont pris en compte.

Les distributions des vitesses semblent suivre une loi stable[4], c'est-à-dire ici que les vitesses sont regroupées dans les petites valeurs et qu'elles sont beaucoup moins nombreuses vers les moyennes et les grandes valeurs. Les distributions varient selon les espèces. Les renards ont une répartition des vitesses plus concentrée dans les très petites valeurs, en dessous de 200 m/h, que les deux autres espèces. Les vitesses estimées ont des fréquences faibles dans les grandes valeurs à partir de 500 m/h. Plus de 65 % des vitesses se situent en dessous de 500 m/h pour les renards, et respectivement 80 % et 75 % pour les chevreuils et les cerfs. La différence entre les deux espèces de cervidés se traduit au niveau des vitesses par une moyenne un peu plus élevée chez les cerfs (environ 450 m/h) qui ont tendance à se déplacer sur des distances plus longues que les chevreuils (360 m/h). Les renards se déplacent soit sur de longues distances (la nuit) soit très peu (plutôt pendant la journée). La moyenne des vitesses pour l'ensemble des vitesses des 4 renards est autour de 1 km/h. Cette différence de déplacement correspond au rythme d'activité de l'espèce entre des phases longues de repos dans des gîtes ou assimilés et des phases de recherche de nourriture sur de longues distances. Nous y revenons dans la partie III-1.4 suivante sur la caractérisation des rythmes de déplacements. Les distances parcourues en 24 heures dans les trois cas d'étude sont en moyenne par individu : de 9,3 km pour les renards à Nancy, de 8,1 km pour les chevreuils et de 9,8 km pour les cerfs.

[4] Il s'agit de l'allure générale de la courbe et non d'un résultat démontré. Les lois stables sont des distributions théoriques des valeurs d'une variable, qui prennent en compte les probabilités du nombre d'occurrences différentes en fonction des valeurs. La loi normale est par exemple une loi stable.

Comme pour la description des espaces parcourus, nous nous intéressons à l'influence de la date de suivi sur les distances parcourues. Dans le cas des renards, peu de jours sont concernés. Nous nous attachons donc aux cervidés dans les Vosges. L'influence de la saison est peu marquée. Nous remarquons les différences des vitesses estimées entre les espèces et entre les individus mais pas entre les dates. Les vitesses semblent plus élevées en fin d'été et en début d'automne par rapport aux autres périodes, mais cette observation reste à confirmer avec un suivi continu sur une année.

La distribution des angles entre les segments linéaires interpolés permet une description de la forme des déplacements qui est utilisée dans la littérature (Tablado *et al.*, 2010 ; Bartumeus *et al.*, 2005). Nous avons cherché à vérifier si les angles relatifs étaient différents pour le renard, le chevreuil et le cerf. Nous avons appliqué le test de Mann-Whitney, test non paramétrique qui permet de déterminer si deux séries de valeurs numériques de distribution non normale ont des valeurs moyennes significativement différentes. Les différences entre le chevreuil et le renard puis entre le chevreuil et le cerf sont significatives à plus de 99 %. La différence entre le renard et le cerf n'est par contre pas significative. Cela indique que la tortuosité des trajectoires des renards (moyenne de 105°) et des cerfs (moyenne de 102°) est similaire alors qu'elle est plus importante chez le chevreuil (moyenne de 112°). Cela peut s'expliquer par le fait que les chevreuils se déplacent moins et restent sur une surface plus restreinte lors de leur recherche de fourrage. Dans les trois cas d'étude, nous avons calculé ces angles et nous avons indiqué leur répartition dans les classes de valeurs des angles relatifs, voir le Tableau III.4. Ces classes de valeurs permettent de caractériser la forme générale plus ou moins rectiligne des déplacements.

Tableau III.4. Le pourcentage des angles relatifs selon les classes de valeurs, pour les renards à Nancy, et les chevreuils et les cerfs dans les Vosges.

Intervalle de valeurs des angles relatifs	Renards, Nancy	Renards, Nancy - période diurne	Renards, Nancy - période nocturne	Chevreuils, Vosges	Cerfs, Vosges
[0°-30°]	8	4	12	12	16
[30°-60°]	12	7	16	11	13
[60°-90°]	19	15	23	10	12
[90°-120°]	20	21	18	12	12
[120°-150°]	15	18	13	19	18
[150°-180°]	26	35	16	35	29

La répartition des angles selon les intervalles de valeurs égaux à 30 degrés ne dépend pas significativement des espèces animales, d'après le test du Khi² lancé sur le Tableau III.4 (sans distinguer pour les renards les périodes horaires). Le résultat n'est également pas significatif si l'on regroupe les classes pour des intervalles égaux à 60 degrés. Nous remarquons pour toutes les espèces que la fréquence la plus élevée concerne les angles entre 150 et 180 degrés. Il s'agit d'angles larges qui peuvent être associés à des changements de direction importants proches de demi-tours. Pour les renards, nous avons distingué les déplacements diurnes des déplacements nocturnes en regroupant les valeurs des angles en 3 intervalles égaux à 60 degrés. Avec cette distinction, la différence entre les classes de valeurs des angles relatifs est significative à 95 % d'après le test du Khi². Il ressort de ce test que les renards ont tendance à effectuer des angles significativement plus grands lors des déplacements en période diurne. 53 % des angles sont au-dessus de 120° en période diurne contre 29 % en période nocturne. Les fréquences des angles relatifs pendant la période diurne sont plutôt similaires à celles des angles pendant 24 h. Cette

forme de déplacement peut être associée à de petits déplacements diurnes à l'intérieur ou autour du gîte de repos ainsi qu'aux imprécisions de localisations lorsque le renard reste statique. Les angles relatifs en période nocturne sont répartis entre les classes de valeurs plus également qu'en période diurne. Ils sont significativement plus petits la nuit (en-dessous de 60°), ce qui correspond à des déplacements davantage rectilignes. Les valeurs les plus fréquentes sont celles comprises entre 60° et 120°, ce qui montre que les renards effectuent des changements de direction plutôt proches du quart de tour lorsqu'ils sont actifs la nuit, en recherche de ressources. Les renards effectuent des déplacements sur de plus longues distances la nuit : il y a relativement moins de changements de direction brusques et ceux-ci sont mieux répartis entre les différentes valeurs. Pour les chevreuils, les angles relatifs sont plus nombreux proches des grandes valeurs, correspondant à des déplacements tortueux. Dans Tablado *et al.* (2010), l'hypothèse est faite que le chevreuil est une espèce sélective et que ses déplacements ont donc une tortuosité plus importante. Cela peut correspondre à nos résultats car le chevreuil a tendance à changer souvent de direction afin de s'orienter vers les ressources alimentaires les plus intéressantes. Concernant le cerf, de nombreux angles sont également élevés, ce qui montre qu'il a un comportement sélectif mais moins que le chevreuil. Une fréquence relativement élevé de petits angles signifie aussi que le cerf effectue des déplacements rectilignes proches de lignes droites pour aller d'un point à un autre.

1.3.3. Le positionnement relatif des animaux à partir des trajectoires

La construction des trajectoires permet d'identifier des parcours communs parmi les individus. Pour les renards, les échantillons ne contiennent pas de rencontres temporaires. Quelques espaces parcourus interpolés se superposent mais ils ne concernent pas les mêmes dates : deux individus à Nancy dont une journée de suivi est en mai 2006 et l'autre en décembre 2006. À Annemasse, un domaine vital se superpose à celui de deux autres individus mais les dates sont décalées d'au moins une année. Sur le site de Pontarlier, deux femelles renards parcourent le même espace. Pour les 19 localisations enregistrées sur chacun des deux individus à moins d'une heure d'intervalle, la distance moyenne est égale à 750 mètres. La plus petite distance les séparant est de 350 m à moins de 15 minutes d'intervalle. Ces remarques correspondent au mode de vie en général solitaire du renard en dehors de la période d'élevage des jeunes. Les individus vivent souvent seul, même si leurs domaines de vie peuvent se superposer et que des rencontres entre individus peuvent avoir lieu la nuit lors des déplacements ou pendant la journée près des gîtes de repos (Henry, 2004 ; Poulle, 1991).

Dans le cas d'étude sur les chevreuils à La Petite Pierre, le domaine vital d'une des femelles est éloigné d'environ 1500 m des deux autres sans proximité des localisations enregistrées. Pour les deux autres chevreuils, ils parcourent des espaces proches pendant les mêmes journées. Il n'y a pas de superposition des enveloppes convexes pendant trois jours, mais il y en a les deux autres journées. Toutes les localisations sont situées à plus de 100 m l'une de l'autre sauf pendant une heure où elles sont situées en moyenne à 50 m, et à un autre moment à 25 m. Le chevreuil est, comme le renard, une espèce solitaire. La taille des domaines vitaux a tendance à diminuer avec la densité de population (Saïd *et al.*, 2005), ce qui est cohérent avec la faible superposition observée entre les domaines vitaux. Pour les cerfs, une femelle est suivie pendant des journées différentes. Les deux autres ont trois journées de suivi en commun. Les localisations sont très proches, ce qui indique que les deux individus se suivent et appartiennent à un même groupe. Par exemple pendant une des journées, la distance moyenne des localisations enregistrées simultanément avec moins de 2 min d'intervalle est égale à 50 mètres (minimum de 2 m et maximum de 340 m). Il s'agit de femelles, et nous savons que les biches vivent en harde. Il est

donc cohérent que certains déplacements se suivent. Sur la journée représentée en Figure III.11.a, la moyenne des distances est de 150 m avec un minimum à 1 m et un maximum à 700 m. La carte nous permet également de visualiser que les individus longent des routes forestières et des chemins ; nous y reviendrons ensuite. Concernant le partage de l'espace entre les deux espèces – chevreuil et cerf –, les espaces parcourus ne se superposent pas du tout ou alors peu et à des moments décalés, à part pendant une journée. Pendant cette journée, la distance moyenne entre les localisations est de 650 m et 330 m entre le cerf et chacun des deux chevreuils. La plus petite distance est de 40 m entre le cerf et un chevreuil, avec douze distances inférieures à 100 m. Il est probable que les deux espèces s'évitent et que le chevreuil s'éloigne des lieux exploités par les cerfs. Une densité élevée de cerfs a un effet négatif sur la condition physique des jeunes chevreuils (Richard *et al.*, 2010), ce qui tend à montrer que le partage de l'espace est plus favorable aux cerfs.

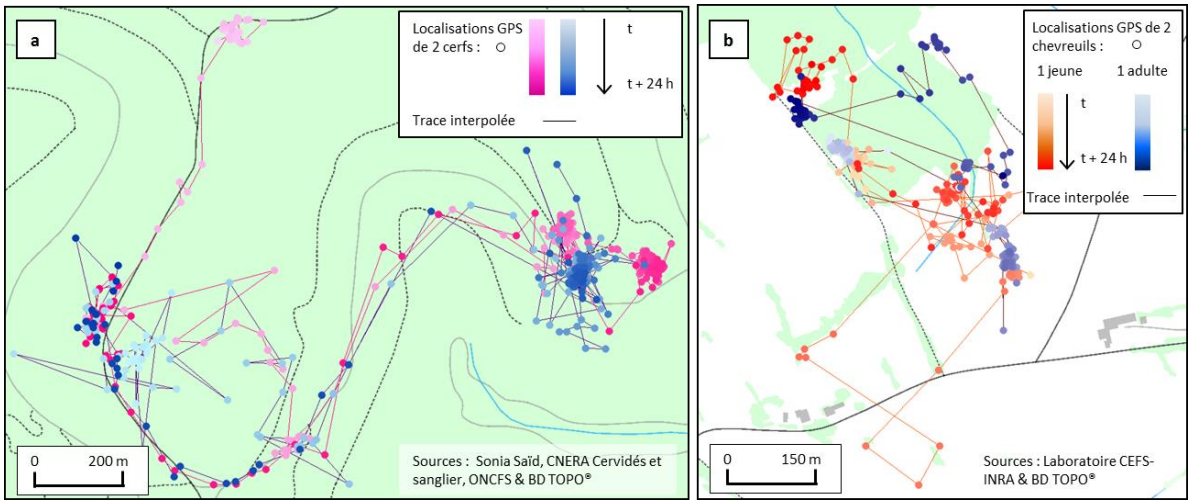


Figure III.11. Les relations entre les individus : a) ces deux biches se suivent pendant la journée dont les localisations sont cartographiées et pendant les autres journées de suivi, b) une femelle adulte suivi pendant une journée, et son jeune, mâle d'environ 10 mois.

Dans le cas d'étude sur les chevreuils à Aurignac, il y a plusieurs associations de jeunes et d'adultes. Ces associations ont généralement lieu jusqu'à un an après la naissance (Thomas, 2003). Dans l'échantillon de 2008, elles sont au nombre de cinq. Celles-ci se traduisent par des localisations proches et incluses dans un même espace, comme illustré en Figure III.11.b. Dans cet exemple, les localisations d'une femelle adulte et de son jeune sont éloignées d'en moyenne 95 m, éloignement compris entre 3 m et 50 m pendant une journée. Il s'agit d'un jeune mâle certainement âgé de 9-10 mois, la journée de suivi étant fin janvier. Sa mobilité a augmenté par rapport à la période après la naissance pendant laquelle l'association avec la mère est la plus grande. Nous constatons un déplacement à l'écart du trajet de sa mère, au sud de la carte qui peut représenter une exploration.

L'interpolation des trajectoires linéaires à partir des localisations permet de caractériser la forme des déplacements entre espèce et entre individus.
- Le renard est une espèce qui peut se déplacer sur de longues distances avec des vitesses pouvant être assez élevées. Un quart de ses vitesses estimées sont comprises entre 1 et 5 km/h, ce qui correspond à des déplacements de recherche de ressources. Le renard vit et se déplace généralement seul, ce qui fait que les différences de déplacements entre les individus sont plus grandes que chez une espèce grégaire.

- Le chevreuil se déplace pendant 24 h sur des distances un peu moins grandes (8,1 km) que le renard (9,3 km) et le cerf (9,8 km). Leur trajectoire semble également plus tortueuse (changements de direction importants) et leurs domaines vitaux sont moins grands (48 ha en moyenne, cf. III-1.2). Cette forme particulière de déplacement correspond bien aux descriptions dans la littérature : le chevreuil est une espèce sélective qui recherche les essences les plus intéressantes pour lui et qui se déplace dans des surfaces limitées.
- Comparée aux deux autres espèces, le cerf est celle qui se déplace quotidiennement sur de plus longues distances. Les trajectoires peuvent être décrites selon des vitesses de déplacement pour la plupart inférieures à 500 m/h. Deux biches parmi les trois suivis font selon toute vraisemblance partie d'une même harde et leurs déplacements s'effectuent donc dans des lieux proches.

1.4. Caractérisation des déplacements

1.4.1. Les rythmes de déplacements

Nous ajoutons à présent la variable temporelle dans la description des déplacements. Nous l'avions déjà ajouté lors de la distinction entre les déplacements diurnes et nocturnes des renards, et nous souhaitons généraliser l'utilisation de l'information temporelle. L'étude des distances et des vitesses estimées nous a permis d'identifier des différences de déplacement entre les espèces et entre les individus. Nous cherchons à caractériser les rythmes de déplacements selon la date et l'heure, et selon la durée. La chronologie des rythmes de déplacements correspond a priori à des activités qui motivent en partie les localisations des animaux. Nous nous intéressons aux rythmes quotidiens des animaux dans l'ensemble des cas d'étude associés à des relevés de fréquences temporelles élevées : renards à Nancy, cervidés dans les Vosges et chevreuils à Aurignac.

Les renards en milieu urbain et les cervidés en milieu forestier

Les distances de chaque segment des trajectoires linéaires sont représentées en fonction de la date. La Figure III.12 montre des exemples de distances parcourues pendant une journée pour un individu de chaque espèce. Ces exemples permettent de visualiser les distances plus clairement que la représentation de tous les individus d'un cas d'étude. Les fréquences temporelles pouvant être irrégulières, des différences entre les valeurs de distances peuvent être dues à des intervalles de temps plus longs (échec de localisation). Ces intervalles longs restent peu nombreux et peuvent être pris en compte lors de l'interprétation des résultats.
Les rythmes des déplacements peuvent être interprétés en fonction des activités des individus. Afin de faciliter l'interprétation, nous avons appliqué un lissage des valeurs de distances par la méthode des moyennes mobiles. La moyenne mobile est utilisée dans l'étude des séries temporelles[5]. Cette méthode prend en compte les valeurs antérieures et ultérieures afin de calculer une valeur lissée à chaque heure. Ceci permet d'obtenir une tendance générale et de réduire les variations locales. Nous avons utilisé 9 valeurs pour calculer la moyenne : la distance à l'heure correspondante, les 4 distances précédentes et les 4 distances suivantes.

[5] Une série temporelle, ou série chronologique, concerne une variable dont la valeur est fonction du temps. Nous en manipulons par exemple dans nos analyses des distances de déplacement en fonction de la date et de l'heure.

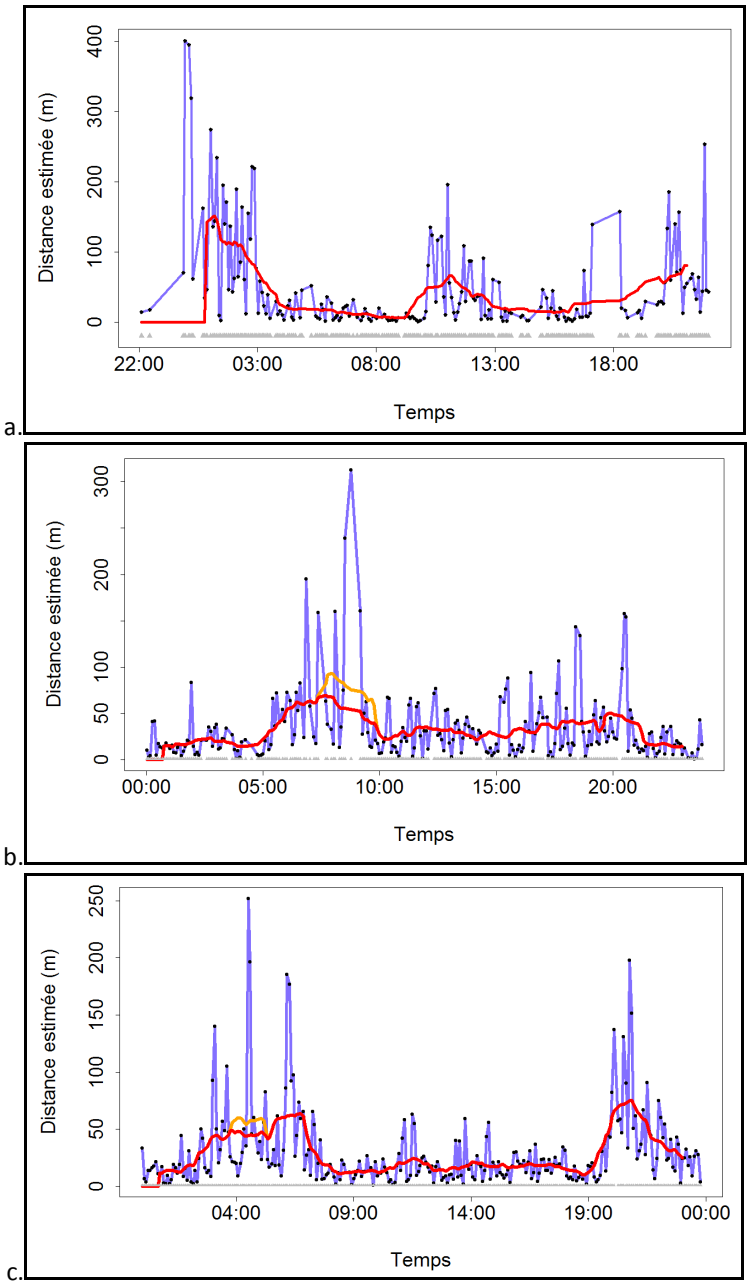


Figure III.12. Les distances estimées par intervalles de temps de 5 min, selon l'heure de la journée. La valeur de la distance en ordonnée correspond à la date finale du segment c'est-à-dire à l'intervalle de temps précédent. Les individus sont : a) un renard dans la périphérie de Nancy les 22 et 23 mai 2006, b) un chevreuil dans les Vosges le 6 septembre 2008, c) un cerf dans les Vosges le 7 juillet 2008. Le lissage par moyennes mobiles prenant en compte 9 valeurs dont les 4 valeurs antérieures, les 4 valeurs ultérieures et la valeur concernée, correspond à la courbe en rouge. Toutes les valeurs sont considérées sauf celles au-dessus de 200 mètres potentiellement issues d'imprécisions de positionnement GPS (en orange, lissage en incluant toutes les valeurs même les distances au-dessus de 200 m).

D'après la Figure III.12.a, les déplacements du renard sont plus importants en période nocturne, entre 20 h et 3 h. Les distances estimées sont moindres pendant la journée, à l'exception de la période entre 11 h et 13 h pour cet individu et cette journée de suivi. Cette opposition entre la période nocturne et la période diurne est observée pour l'ensemble des individus de renard. En Figure III.13, les distances parcourues pendant des durées de 5 min sont représentées pour tous les renards suivis par intervalle de valeurs de 50 m.

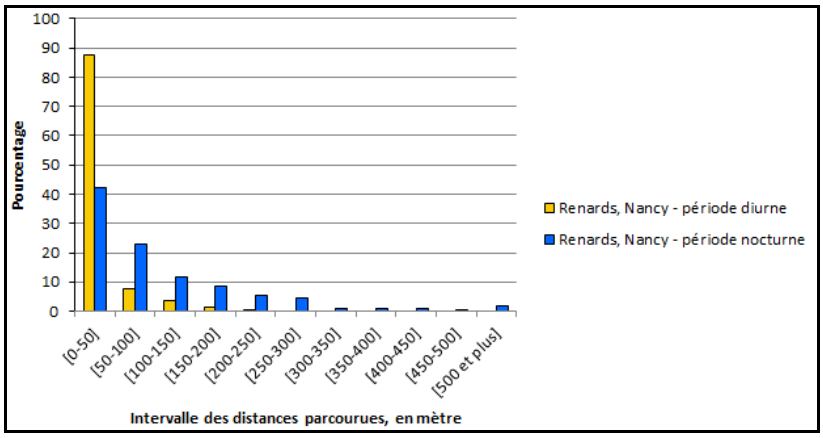


Figure III.13. Les distances parcourues par les 4 renards suivis à Nancy (localisations GPS de l'Anses), pendant une durée d'en moyenne 5 min : distinction entre la période diurne et la période nocturne.

87 % des distances en période diurne sont inférieures à 50 m, alors qu'elles ne représentent que 42 % la nuit. En période nocturne, 50 % des distances sont comprises entre 50 et 300 m. Le test du Khi² lancé sur les distances réparties en 4 classes de valeurs (moins de 50 m, entre 50 m et 100 m, entre 100 m et 150 m, plus de 150 m) et selon la période diurne et nocturne montre que ces distances sont différentes avec une significativité supérieure à 99 %. Les renards se déplacent significativement sur de plus petites distances – inférieures à 50 m – pendant la journée, et sur de plus grandes distances la nuit surtout pour les distances supérieures à 100 m. Ces observations confirment l'importance des déplacements des renards la nuit. En milieu urbain où les dérangements peuvent être plus nombreux, les renards y sont en effet plus actifs. Dans l'échantillon étudié, leurs déplacements sont vraisemblablement dédiés à la recherche de nourriture.

Les rythmes quotidiens des cervidés dans les Vosges sont moins évidents à caractériser à partir des distances. Pour le chevreuil dont les distances sont représentées en Figure III.12.b, une période d'activité se situe entre 5 h et 10 h. Il peut s'agir de la période de gagnage décrite dans la littérature (Arbouet, 2006), pendant laquelle les animaux vont se nourrir dans les cultures et dans les zones de ressources de leur lieu de vie. Sur le site d'étude, il n'y a pas de cultures. Les chevreuils restent dans la forêt mais peuvent se montrer actifs à l'aube. Cette période d'activité de début de matinée n'est pas toujours bien identifiable selon les chevreuils et selon les journées de suivi dans le cas d'étude des Vosges. Dans notre échantillon de données, il apparaît plutôt une alternance entre des phases de déplacements faibles ou nuls, et des phases de déplacements plus importants. Les phases de déplacements faibles peuvent correspondre à une station assise de l'animal lors d'un repos ou d'une exploitation d'un site alimentaire très restreint avec peu de déplacements (par exemple autour de 15 h en Figure III.12.b). Les déplacements plus importants peuvent être associés à la recherche de nourriture ou à un changement de sites de repos (par exemple sur la Figure III.12.b, juste après 15 h).

Le cerf dont les distances sont représentées en Figure III.12.c, possède des déplacements plus importants en début et en fin de période nocturne pendant la journée d'étude choisie. Comme pour les chevreuils, des phases de déplacements importants semblent s'intercaler entre des phases de repos ou de déplacements courts. De grandes distances sont parcourues ponctuellement plusieurs fois pendant un cycle de 24 heures, notamment 2 fois en Figure III.12.c. Pour l'ensemble des journées des 3 cerfs suivis dans les Vosges, les phases de déplacements sont observées entre 5 et 15 fois par jour et par individu, si l'on considère les distances parcourues de plus de 100 m dans un intervalle de 5 m. Il s'agit de déplacements continus, c'est-à-dire avec pas ou peu d'arrêts, et avec une vitesse élevée de plus de 5 km/h. Ces déplacements peuvent être dirigés vers une destination connue, par exemple, un site éloigné de

ressources. En dehors de ces déplacements sur de longues distances, on constate des périodes de déplacements très faibles, comme pour les chevreuils (par exemple pour le cerf Figure III.12.c : autour de 12 h). Des déplacements sur de moyennes distances, entre 20 et 50 m, pendant plusieurs intervalles de temps successifs de 5 min peuvent être interprétés comme des déplacements de recherche de nourriture.

Étude de la variabilité interindividuelle et journalière des chevreuils

Une certaine variabilité entre les individus est observée quels que soit les milieux d'étude et les espèces animales. Certaines remarques sont toutefois généralisables au comportement de l'espèce. Afin de visualiser les deux facteurs de variabilité, individu et jour, nous avons représenté en Figure III.14 un extrait des estimations de distances dans le cas d'étude des chevreuils à Aurignac. La figure concerne plusieurs périodes de 24 h, commençant et terminant à midi, une fois par mois de février à décembre, pour deux chevrettes adultes. Nous avons appliqué la méthode des moyennes mobiles afin d'obtenir les principales phases de types de déplacements caractérisés selon les distances parcourues.

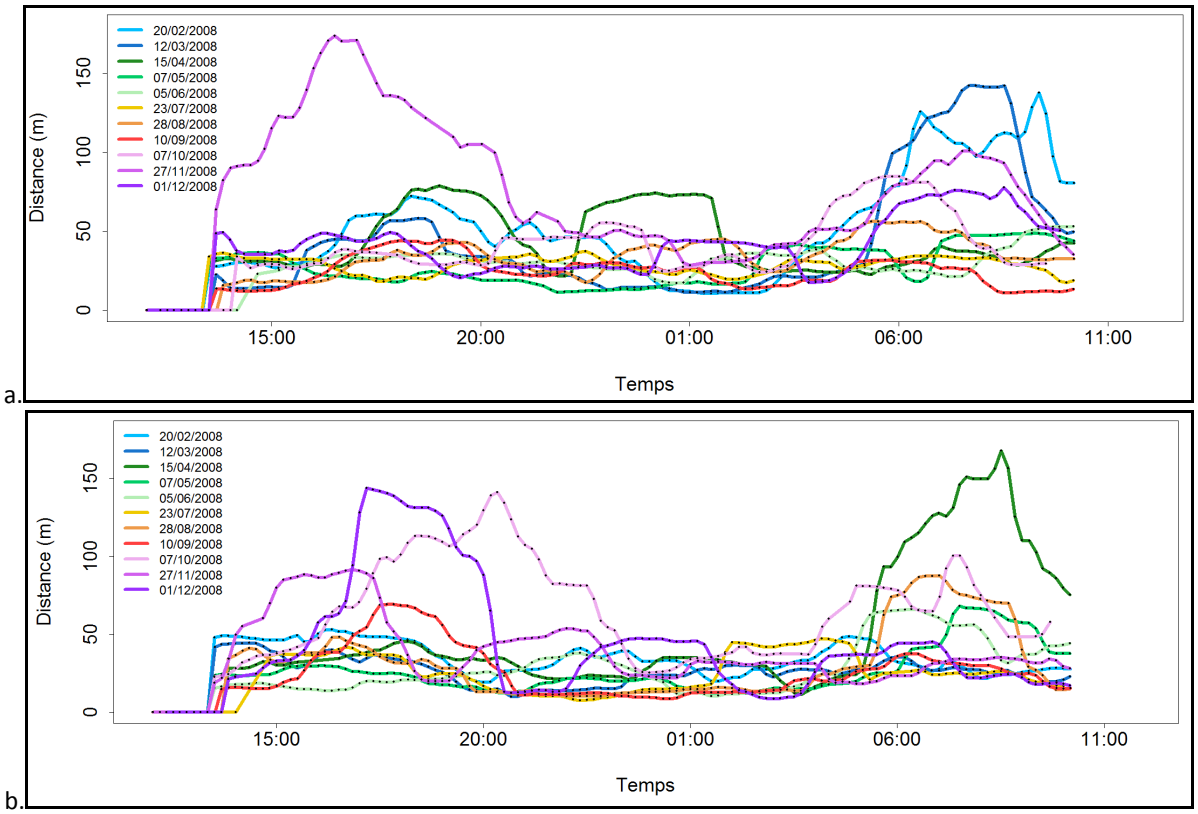


Figure III.14. Valeurs de distances calculées à partir de la méthode des moyennes mobiles sur 9 valeurs en fonction de l'heure, à partir des distances parcourues estimées dans des intervalles de temps de 10 minutes. Représentation d'une même période de 24 h par mois entre février et décembre 2008 pour 2 chevreuils femelles adultes dans le canton d'Aurignac (a et b). Une couleur correspond à une date. Les domaines vitaux de ces 2 chevrettes sont composés principalement de cultures et de petites zones boisées.

D'après la Figure III.14, nous remarquons que des déplacements ont lieu sur de plus grandes distances en début de matinée. Les grandes distances peuvent être associées à des déplacements entre des sites d'intérêt, comme entre un bois et des cultures. Par exemple, le chevreuil en Figure III.14.a présente une activité de déplacement plus importante entre 4 h et 9 h pendant plusieurs journées de suivis. Le chevreuil en Figure III.14.b se déplace moins que le premier chevreuil, mais il semble également plus actif à l'aube. Ce comportement se retrouve

chez la plupart des chevreuils suivis sur le site d'Aurignac. Il correspond également aux comportements des chevreuils sur le site des Vosges. La période du soir semble également propice aux déplacements sur des distances plus importantes en moyenne. D'après la Figure III.14.a, cette période s'étale entre 17 h et 21 h pour quelques journées.
Des déplacements sont observés sur de grandes distances et pendant des durées de quelques heures. Ces déplacements sont exceptionnels et ils se détachent par rapport aux rythmes moyens des chevreuils. Il peut s'agir de déplacements exploratoires ou dirigés vers un site connu éloigné. Par exemple, en Figure III.14.a, le déplacement du 27 novembre (courbe rose-violet) a lieu sur une distance de 4 km entre 14 h et 20 h. Il s'agit dans ce cas de déplacements exploratoires sur une surface de 0,3 km².
La méthode des moyennes mobiles lisse les valeurs de distance et rend moins visible l'alternance entre des phases courtes de déplacements rapides et de déplacements lents ou de repos. Nous pouvons toutefois constater que les distances moyennes sont en majorité comprises entre 0 et 50 m dans des intervalles de temps de 10 minutes. Nous constatons aussi que les distances parcourues sont un peu plus élevées en automne et en hiver (courbes dans les teintes de violet et de bleu), en Figure III.14.a plutôt pendant la période du matin, et en Figure III.14.b pendant la période du soir. Les journées en été (courbes de teintes orangées) paraissent correspondre à des distances plus courtes. L'étude des superficies parcourues des chevreuils dans les Vosges en fonction de la saison n'avait pas permis de tirer de conclusions. Il est probable que les superficies parcourues soient un peu plus grandes en hiver, mais sans lien avec les distances parcourues. Dans le cas d'étude d'Aurignac, il est également difficile de conclure car nous voyons la différence interindividuelle illustrée en Figure III.14 : le chevreuil (b) réalise également des déplacements rapides dans la matinée en été et printemps (courbes dans les teintes de vert). Il peut paraître logique que les chevreuils se déplacent davantage en hiver car ils recherchent des lieux de ressources plus rares. D'un autre côté, ils doivent limiter leur dépense d'énergie. De manière générale, la représentation des rythmes quotidiens des chevreuils confirme les distances parcourues relativement faibles (et les vitesses faibles) en lien avec la taille limitée des domaines vitaux. Des déplacements plus rapides peuvent avoir lieu, en particulier à certaines périodes de la journée (matinée). Des déplacements de migration, non représentés en Figure III.14, sont observés plutôt au printemps pour les jeunes et les yearlings lors de la recherche d'un nouveau domaine de vie, et pour les adultes généralement en été en période de reproduction.

Les rythmes quotidiens de déplacements présentent des caractéristiques communes par espèce étudiée, même si une variabilité individuelle et journalière est constatée. Les déplacements des renards sont faibles pendant la journée et correspondent à de grandes distances la nuit. Pour les chevreuils et les cerfs, l'alternance des phases statiques et des déplacements s'effectue sur des périodes plus courtes de l'ordre de quelques minutes à quelques heures.

1.4.2. Les différents types de déplacements

La segmentation des trajectoires en pauses et en déplacements longs

Nous avons utilisé les traces linaires afin de décrire la forme des déplacements par le calcul des vitesses, des angles relatifs et des distances parcourues. Grâce à cette description, les déplacements semblent se décomposer en pauses et en mouvements de déplacements plus rapides. Les pauses et les déplacements effectifs peuvent être associés à des lieux particuliers. Les lieux de pauses sont peu étendus, comme des gîtes de repos. Les lieux de déplacements rapides peuvent être plus larges. Dans le cas des déplacements sur de petites distances, il peut

s'agir d'une petite zone arborée pour des recherches localisées de ressources alimentaires. Les déplacements sur de longues distances sont souvent entrepris pour atteindre des lieux éloignés, connus ou non. Nous proposons de caractériser la trajectoire et de la structurer en fonction des distances parcourues selon des phases de pauses (que l'on peut aussi qualifier d'arrêts) dans un espace restreint, et selon des phases de déplacements rapides sur des distances plus longues. Nous définissons les deux concepts de pauses et de déplacements longs tels que nous les avons utilisés dans l'analyse des trajectoires. Que ce soit pour les pauses ou pour les déplacements rapides, nous nous appuyons sur les valeurs de distances et sur leur chronologie. Le critère de succession de distances avec un même ordre de grandeur est respecté. Une pause est caractérisée à la fois par le temps et par les distances (Spaccapietra, 2008 ; Buard, 2013). Une trajectoire est composée de pauses et de déplacements :

```
Une trajectoire = {pauses, déplacements longs}
```

Nous déterminons les pauses et les déplacements par une sélection des localisations connues des animaux selon la méthode définie ci-dessous.

(a) Détermination des pauses :

Une pause est définie comme un extrait de trajectoire pour lequel les distances parcourues restent faibles dans un espace réduit, et dont la durée est relativement longue. Trois valeurs seuils sont à paramétrer : la distance maximale parcourue entre deux points successifs (s1), la distance maximale entre chaque point deux à deux pendant la pause (s2), la durée minimale de la pause (s3). Les pauses sont définies en suivant les étapes suivantes :

- Un point de localisations est sélectionné si les distances entre ce point, celui qui précède et celui qui suit, sont inférieures à une valeur seuil fixée s1. Ce seuil est paramétrable selon le type de pause que l'on souhaite identifier. Il peut s'agir de déplacements sur de courtes distances, ce qui nécessite un seuil pas trop petit. Si l'on souhaite extraire les localisations correspondant à une station statique de l'animal, la distance sera plus petite mais non nulle afin de considérer les imprécisions de localisations.
- Parmi cette sélection de points, des groupes sont définis. Un groupe correspond à au moins deux points se suivant chronologiquement. Un groupe est conservé si sa durée totale est supérieure au seuil s3.
- Par groupe, les distances entre tous les points deux à deux sont calculées. Les groupes pour lesquels les distances sont inférieures au seuil s2 sont conservés.

Les pauses sont ensuite caractérisées par leur durée et par leur barycentre.

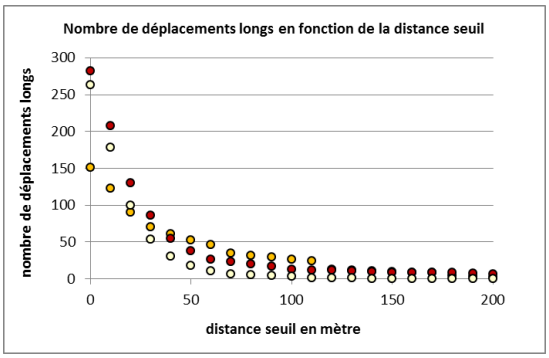
(b) Détermination des déplacements :

Les déplacements effectifs, ou longs, correspondent aux segments de la trajectoire dont les longueurs sont supérieures à une valeur seuil (s4). Ce seuil peut être différent du seuil s1 de détermination des pauses mais il correspond logiquement à une distance plus grande. Les segments se suivant chronologiquement sont caractérisés par une durée totale.

Les seuils de distances maximales et de durées pour caractériser les pauses et les déplacements d'une trajectoire dépendent des espèces. Une pause pour un grand mammifère pourrait être considérée comme un déplacement long pour un plus petit animal. Sur la Figure III.15, nous avons représenté les effets de la valeur de la distance seuil s1 et s4 sur le nombre de pauses et de déplacements longs extraits pour les trois espèces, renard, chevreuil et cerf. L'échantillon de données concerne un animal par espèce suivi pendant une journée. Dans ce test, nous n'avons pas appliqué le critère de sélection par le seuil de distance s2 entre tous les points de la pause. La durée entre les points étant en moyenne de 15 minutes, nous avons considéré que cette

durée est suffisamment longue pour un rythme de déplacement quotidien pour ne pas fixer de durée minimale s3. Le nombre de déplacements longs décroît avec l'augmentation de la distance seuil maximale pour les trois espèces. Il décroît le plus vite pour le chevreuil, puis pour le cerf et enfin le renard. Le chevreuil est en effet une espèce qui se déplace sur de petites distances, généralement moins grandes que le cerf et le renard. Le renard peut parcourir par contre de plus grandes distances pendant un même intervalle de temps. Le nombre de pauses est faible avec la distance seuil à 10 m : 5 pour le renard, 6 pour le chevreuil et 10 pour le cerf. Cet effet est dû à une fragmentation des pauses pour les petites valeurs de seuil par rapport aux grandes valeurs car les localisations peuvent ne pas vérifier la condition de distance maximale précédente et suivante. Pour le cerf et le chevreuil, ce nombre est élevé vers 30 m et diminue avec les grandes valeurs. Cela signifie qu'ils ont des localisations assez regroupées, mais séparées d'au moins 30 m. Dans le cas du renard, nous remarquons que le nombre de pauses est moins sensible à la variation de la distance seuil entre 30 et 100 m que pour les cervidés. Cela traduit le fait que les renards ont des pauses de longue durée alors que les cervidés alternent des phases de pauses et de déplacements plus courtes.

a.



b.

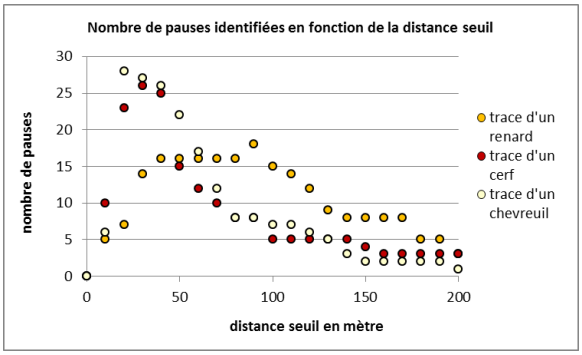


Figure III.15. Effet de la valeur de distance seuil sur la segmentation des trajectoires : a) seuil s4 sur le nombre de déplacements longs, b) seuil s1 sur le nombre de pauses. Exemples pour le suivi pendant 24 heures de 3 individus appartenant aux 3 cas d'étude suivant : renard dans la périphérie de Nancy (153 localisations), cerf (265 localisations) et chevreuil (284 localisations) dans les Vosges du Nord. L'intervalle de temps entre les localisations est en moyenne de 15 min.

La segmentation de la trajectoire est illustrée en Figure III.16 pour le renard correspondant à la courbe de la Figure III.15. La trajectoire initiale est celle cartographiée en Figure III.16.a à l'aide d'une teinte principale dégradée en camaïeu en fonction de la chronologie. La saturation de la teinte s'intensifie avec l'avancée dans le temps. En Figure III.16.b, les pauses sont symbolisées par un ponctuel dont la taille varie en fonction du nombre de points sélectionnés par pause et qui est situé au barycentre. Les déplacements longs correspondent aux segments de longueur supérieure à la distance seuil minimale. La distance seuil maximale s1 est ici de 150 m, ainsi que la distance seuil minimale s2. 10 déplacements longs sont extraits. 8 pauses sont identifiées pendant des durées variant de 20 minutes à 5 heures.

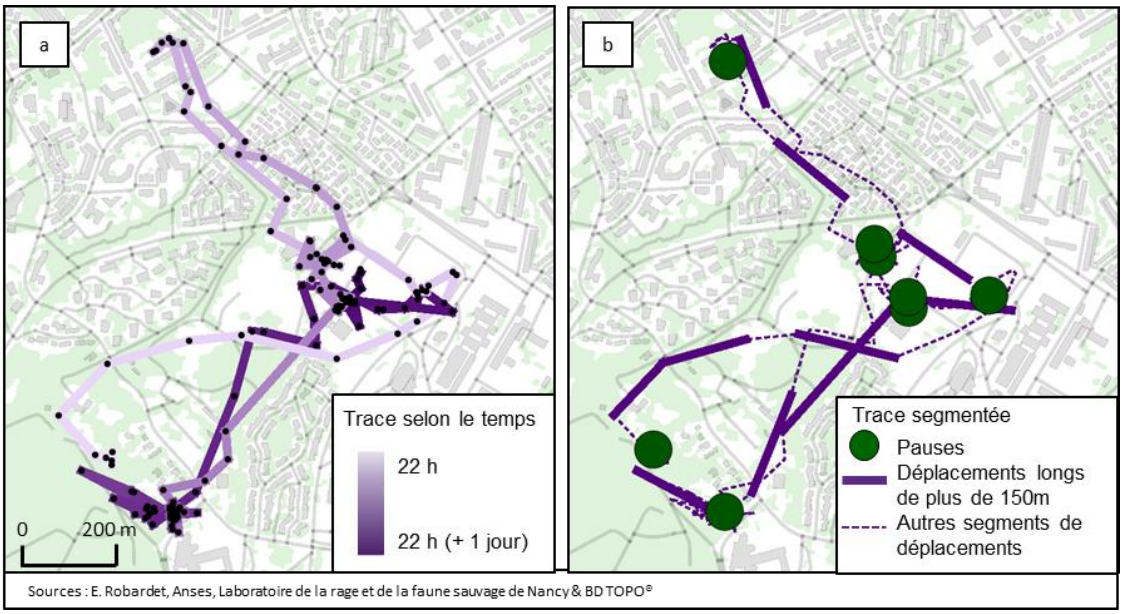


Figure III.16. Cartographie de la chronologie et de la segmentation de la trajectoire d'un renard dans la périphérie de Nancy pendant 24 h : a) segments représentés selon l'heure de la journée, b) pauses et déplacements longs. Visualisation des données géographiques en transparence.

Par la suite dans la partie III-2, nous prendrons en compte la description de l'environnement spatial afin de préciser les lieux de pauses et les chemins de déplacement.

Extraction des déplacements d'exploration et de dispersion

La segmentation des trajectoires pendant une journée selon des phases de rythme homogènes peut s'adapter à des durées plus longues. Comme nous l'avions vu lors de la description des trajectoires, des déplacements exceptionnels ont lieu au cours d'une année. Les déplacements exceptionnels sont essentiellement des déplacements d'exploration et de dispersion. Les dispersions peuvent être le fait des juvéniles ou alors liées à la période de reproduction. Les déplacements exploratoires sont ceux réalisés en dehors du domaine vital habituellement parcouru. Nous cherchons à extraire ces déplacements car ils s'effectuent dans un contexte spatial pas ou peu connu des animaux. L'appréhension des éléments du paysage peut alors être différente dans un espace peu fréquenté que dans l'aire d'activité principale du domaine vital. L'étude de ces déplacements est particulièrement intéressante pour le chevreuil qui est l'espèce se déplaçant le moins en distance et qui parcourt les plus petites superficies. Sur le site d'étude d'Aurignac, les localisations sont enregistrées pendant plusieurs mois, ce qui permet de visualiser des déplacements exploratoires ou de dispersion. Afin d'extraire automatiquement les déplacements exceptionnels, nous proposons une méthode impliquant une estimation du domaine vital et l'extraction de localisations selon des critères définis. Cette méthode se décline comme suit.

- L'aire d'activité principale du domaine vital est estimée à partir de l'ensemble des localisations. En Figure III.17, son estimation est par exemple effectuée par l'interpolation par noyau comprenant 90 % du nombre total de localisations. Elle pourrait également être estimée par la méthode LoCoH à 90 % (cf. III-1.2).
- Cette aire d'activité principale est majorée par une zone tampon afin de conserver les localisations proches de l'aire. Pour les chevreuils à Aurignac, cette zone a pour largeur 200 m, afin de rester cohérent avec les distances parcourues pendant les déplacements journaliers qui s'éloignent peu du domaine vital. Selon la largeur de la zone tampon, il est possible d'élargir ou de restreindre la notion de déplacements exceptionnels.

- Les localisations situées en dehors de l'aire d'activité principale majorée sont sélectionnées. Les déplacements correspondant sont modélisés par les segments entre la ou les localisations sélectionnées se suivant chronologiquement. Les localisations précédentes et suivantes sont également associées à ces déplacements afin de visualiser les trajets entre l'intérieur et l'extérieur de l'aire d'activité.

Les déplacements extraits concernent des allers simples vers un nouveau lieu à proximité du domaine vital, qui peut devenir le nouveau domaine vital de l'animal. Il s'agit également de déplacements exploratoires sur de courtes durées avec un retour vers le domaine de vie initial. Ce dernier cas est illustré par la Figure III.17 sur les déplacements annuels d'une chevrette adulte. Pendant les 11 mois de suivis, 18 déplacements exploratoires sont identifiés en suivant notre méthodologie. Nous distinguons 3 types de déplacements selon l'éloignement au domaine vital :

- 12 déplacements très proches, à moins de 200 m. Les déplacements extraits les plus proches ne s'éloignent que de 10 m de l'aire d'activité majorée. Cette distance est faible mais les localisations concernées représentent toutefois des écarts par rapport à l'espace habituel ;
- 5 déplacements sur de moyenne distance, entre 200 m et 1 km ;
- un déplacement qui s'éloigne sur une distance importante, de 3 km (symbolisé en rouge) et qui a lieu pendant 12 heures.

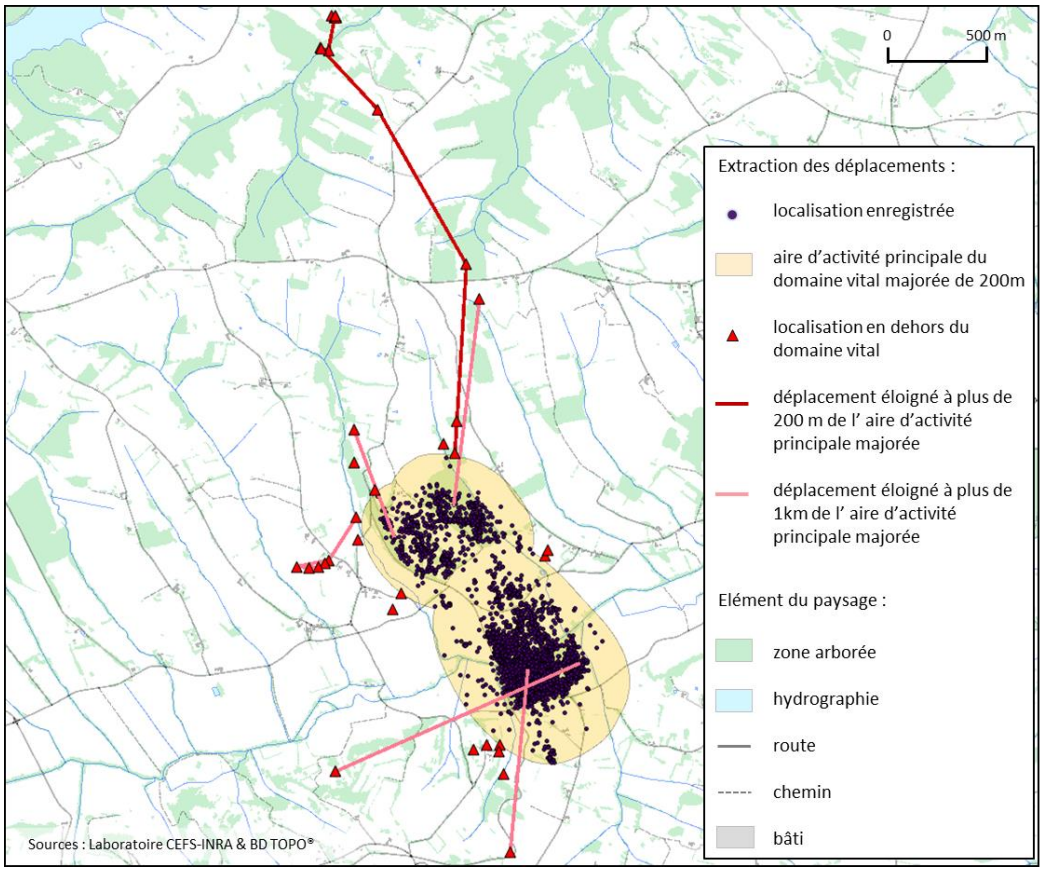


Figure III.17. Extraction des déplacements exceptionnels en dehors de l'aire d'activité principale. Exemple sur une femelle chevreuil adulte suivie pendant 11 mois en 2008 dans le canton d'Aurignac.

La Figure III.17 correspond à des déplacements d'un individu adulte, qui est a priori attaché à son domaine vital. Comme analysé précédemment, les jeunes chevreuils et les yearlings ont tendance à effectuer des déplacements plus longs et sans retour vers la zone quittée. Ces

dispersions peuvent concerner des distances jusqu'à 50 km du lieu de naissance. Dans le cas de la Figure III.17, on constate que lors du déplacement le plus éloigné, le chevreuil passe par un bois et arrive à un autre bois avant de faire demi-tour. La question des motivations aux déplacements et de lieux d'intérêt est abordée dans la partie suivante III-2.
Pour nos autres cas d'étude, les déplacements exceptionnels ne sont pas observés à partir des échantillons. Les renards en milieu périurbain et les cervidés suivis en milieu forestier ont des déplacements de rythme a priori quotidien.

Les déplacements peuvent être caractérisés selon des rythmes : pauses ou déplacements sur de longues distances. Pour les renards en milieu périurbain et les cervidés en milieu forestier, cela va nous permettre d'identifier les lieux d'intérêt où les animaux restent et se déplacent de préférence quotidiennement. Pour les chevreuils en milieu agricole et boisé, nous nous intéressons également aux déplacements exceptionnels en dehors des domaines vitaux.

Synthèse de l'analyse des localisations

Dans cette première partie, nous avons analysé les déplacements à partir des localisations enregistrées sur les animaux selon les spécifications des échantillons de données. Le Tableau III.5 synthétise les connaissances que nous avons apprises à partir des données disponibles. Ces connaissances sont intégrées au modèle de données que nous avons défini et que nous présentons dans le chapitre IV.
Les facteurs explicatifs des déplacements des animaux se réfèrent à l'espèce et aux caractéristiques des sites d'étude. Les besoins des animaux se traduisent dans leurs déplacements. Ils peuvent correspondre à des éléments de l'environnement spatial comme les ressources alimentaires. Ces déplacements sont également influencés par les éléments du paysage. Cette influence est étudiée dans la deuxième partie du chapitre III. La caractérisation des déplacements est mise en perspective de l'environnement spatial des animaux afin de chercher des relations entre les éléments du paysage et les déplacements concernant les aspects suivants :
- l'identification de préférences paysagères dans le choix de l'espace parcouru et du type d'habitat ;
- la composition paysagère du domaine de vie et les préférences au niveau du microhabitat ;
- l'influence du paysage sur les distances parcourues et les vitesses associées ;
- l'identification des sites selon les activités : sites de repos, zones de refuges, lieux de ressources, zones de déplacements ;
- l'identification des obstacles et des éléments favorables aux déplacements.

Nous intégrons à présent la description des éléments du paysage dans l'analyse des déplacements.

Tableau III.5. Résultats principaux de l'étude des localisations enregistrées correspondant aux cas d'étude.

Analyse des localisations	renard	chevreuil	cerf
La superficie des espaces parcourus	Surface de 1 km² en moyenne parcourue par jour.	Relativement peu étendu : en moyenne 0,5 km² par jour en milieu forestier.	2,5 km² en moyenne par jour.
Les distances parcourues	Les déplacements peuvent être dirigés (sinuosité moyenne) avec des distances longues jusqu'à 10 km en une nuit. Les distances faibles sont plutôt associées au repos pendant la journée.	Des distances de plusieurs kilomètres pour changer de sites d'exploitation sont observées sur le site d'étude d'Aurignac. Dans les Vosges, les distances parcourues restent autour de 8 km par jour à l'intérieur du domaine vital.	Des sites d'activité séparés par des distances d'environ 2 km sont rejoints par les cerfs pendant une journée. L'estimation des distances totales parcourues par jour est de 10 km.
Le rythme de déplacement	Opposition entre la période diurne de repos et la période nocturne d'activité correspondant à des déplacements longs.	- Alternance entre phases de repos et phases de marche pendant quelques heures, avec une activité importante remarquée en matinée. - Déplacements annuels de dispersions juvéniles, de reproduction ou d'exploration.	Alternance entre phases de repos et phases de marche de quelques heures chacune.

2) La prise en compte de l'espace : l'influence des éléments du paysage sur les animaux

L'enregistrement des localisations des animaux à des instants connus a permis de caractériser leurs déplacements en termes d'emprise géographique et de rythme temporel. Notre objectif est à présent de caractériser l'influence des éléments du paysage sur la faune lors de leurs déplacements. Dans cette seconde partie, nous considérons les données décrivant le paysage conjointement avec les localisations. Les principales questions posées sont les suivantes : où sont les animaux ? Où vont-ils et par où passent-ils ? Dans un premier temps, nous nous attachons à décrire la situation des animaux par rapport aux éléments du paysage. Nous calculons alors des relations géométriques entre les deux sources de données afin de visualiser d'éventuels patrons de déplacements en lien avec les éléments du paysage. Cette description de la situation des animaux nous permet de préciser ensuite nos recherches sur leurs préférences spatiales. Nous nous intéressons à la sélection des habitats. Il s'agit d'identifier si les domaines de vie (que nous appelons aussi les espaces parcourus selon les cas) présentent des particularités par rapport à un espace plus large. Nous comparons la composition des domaines de vie et celle du site d'étude. L'emprise des sites d'étude – aussi appelé zones d'étude – considérée est le rectangle englobant majoré de 1 km de l'ensemble des localisations des animaux. Nous affinons notre questionnement sur la sélection des chemins de déplacements par les animaux. Nous caractérisons pour cela le paysage autour des localisations et des traces linaires afin de mettre en évidence des préférences paysagères locales. Nos analyses intègrent en majorité les données géographiques à grande échelle spatiale, notamment la BD TOPO®. Les autres sources de données sont exploitées en fonction des différentes questions posées. Ces questions et la démarche méthodologique pour tenter d'y répondre sont résumées en Figure III.18.

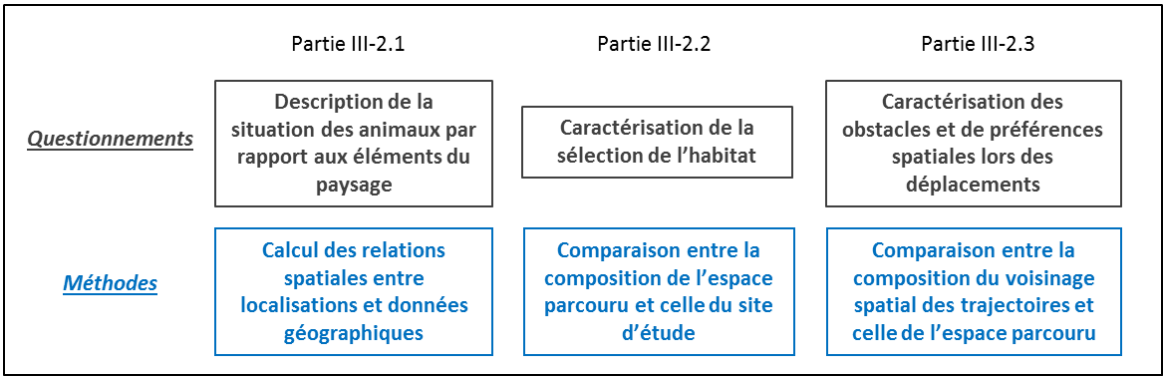


Figure III.18. Les questionnements et les méthodes proposées pour caractériser l'influence de l'espace sur les déplacements d'animaux.

2.1. Description de la situation des animaux par rapport aux éléments du paysage

Nous nous intéressons à la situation des animaux dans leur environnement spatial. Nous souhaitons caractériser où sont les animaux, pour ensuite comparer leur situation à un voisinage plus large et identifier éventuellement des préférences spatiales (dans les parties III-2.2 et III-2.3). Afin d'analyser les relations entre le positionnement des animaux et le paysage, nous croisons les localisations enregistrées et les données de description de l'espace. Nous appelons

ces dernières données « géographiques » ou « topographiques », ce qui inclut non seulement la forme du terrain mais également la description d'éléments tels que les routes, les bâtiments et la végétation. Ces données correspondent à des données d'occupation du sol sans exhaustivité des thèmes. Les relations géométriques calculées concernent l'inclusion ou l'exclusion des localisations dans les thèmes géographiques ainsi que les distances euclidiennes. Les données topographiques sont prises en compte par thème, par exemple le thème des routes. La situation géométrique des localisations est caractérisée différemment selon ces thèmes. Les aspects à prendre en compte sont l'emprise géométrique des thèmes et les informations attributaires disponibles. Nous nous sommes principalement concentrée pour l'étude de ces relations sur les renards dans la zone périurbaine de Nancy et sur les cervidés dans les Vosges du Nord. Ces cas correspondent à des enregistrements de localisations par GPS. Les échantillons de données nous permettent d'analyser des comportements individuels et d'estimer des tendances générales par espèce et par site d'étude.

2.1.1. Étude du relief dans lequel se situent les animaux

Nous souhaitons étudier si le relief a une influence sur la situation des animaux et sur leurs déplacements. Nous cherchons à définir la forme du terrain sur laquelle sont observés les individus. Les relations entre le relief et les localisations concernent le rôle des altitudes et des pentes. Nous utilisons le MNT de précision planimétrique de 25 mètres et de précision altimétrique de 1 mètre. Les pentes sont calculées à partir de ce MNT grâce au logiciel de SIG GRASS. Les valeurs d'altitude et de pente sont déterminées pour chaque couple (x, y) des localisations enregistrées. Les localisations obtenues par colliers GPS possèdent une coordonnée en altitude calculée à partir des satellites (voir la partie sur la description des données en II-3.2). Les valeurs d'altitude qui nous intéressent sont celles du MNT afin de caractériser l'espace sur lequel se situent les animaux, de le comparer à celui du site et d'étudier l'évolution chronologique des déplacements.

Analyses des altitudes et des pentes pour le cas des renards dans l'agglomération de Nancy

La zone périurbaine autour de Nancy présente un relief relativement plat. Les localisations ont été enregistrées pour chaque renard dans des sites distincts dont seuls deux se superposent partiellement. Malgré cela, sur l'ensemble des renards suivis dans la périphérie de Nancy, l'écart-type des altitudes parcourues reste faible : proche de 10 m pour une moyenne par individu d'environ 235 m. Les renards fréquentent différentes classes d'altitudes mais celles-ci restent dans des valeurs proches (nous verrons dans le III-2.2 que c'est aussi vérifié pour les deux autres cas d'étude sur les renards à Annemasse et à Pontarlier). Les altitudes correspondant aux localisations varient en effet peu, entre 210 et 310 m.
Nous analysons les variations d'altitudes dans les déplacements pendant une journée par individu. La Figure III.19 montre l'exemple des altitudes correspondant aux localisations d'un renard (numéroté 2) pendant 24 heures. Cet individu parcourt une aire de transition entre une zone urbaine, des cultures, des pairies et des bois. Il se déplace entre deux principales zones dont les altitudes moyennes respectives sont 220 m (aire urbaine) et de 240 m (bois). La moyenne et l'écart-type des altitudes parcourues sont respectivement de 237 m et de 9 m. L'intervalle est compris entre 218 m et 246 m. À partir de 18 h, le renard s'éloigne de son emplacement diurne qui est situé dans un bois et il parcourt les abords de la commune la plus proche localisée sur des altitudes plus basses.

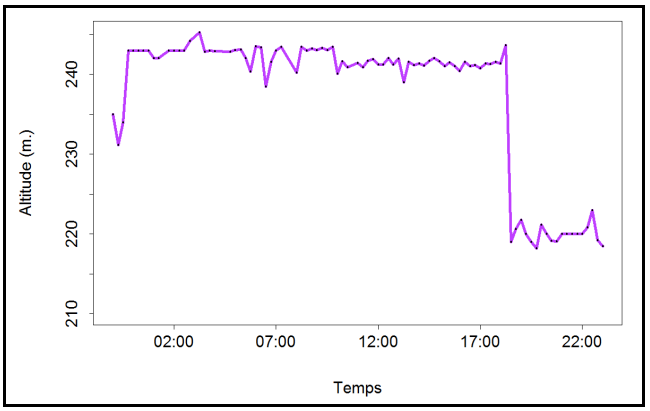


Figure III.19. Les valeurs d'altitudes en fonction du temps. Exemple de localisations enregistrées pendant 24 heures pour un renard en zone périurbaine relativement plane à Villers-lès-Nancy.

Deux autres individus (1 et 4) occupent un domaine vital en zone fortement urbanisée avec un relief plat. Le renard 3 parcourt une zone comprenant un parc urbain vallonné avec des différences d'altitudes jusqu'à 75 m. Sur la Figure III.20, les pentes sont représentées par individu et par jour, un des individus étant suivi pendant deux journées. Seul l'individu 3 parcourt des pentes de plus de 10 degrés et 44 % de ses localisations sont situées sur des pentes supérieures à 5 degrés.

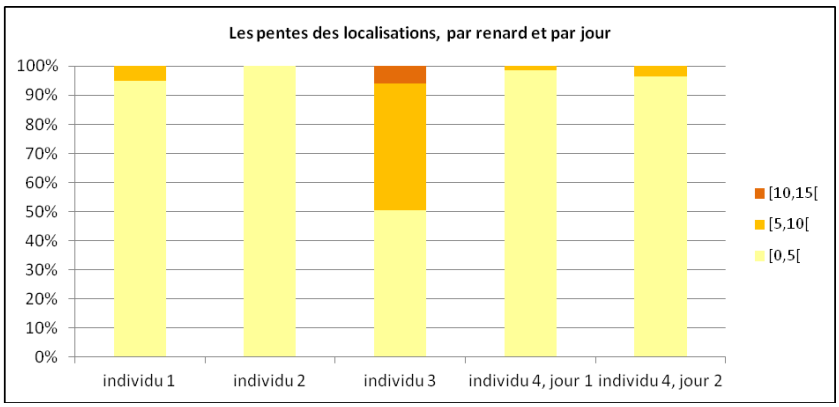


Figure III.20. Le pourcentage des localisations situées dans les classes d'intervalles de 5° pour chaque individu de renard aux environs de Nancy.

Au vu du site d'étude (carte en Annexe 1), il est délicat de formuler une conclusion quant aux préférences topographiques des renards. Les pentes faibles ou moyennes (au-delà de 10 degrés) ne semblent pas constituer un obstacle car certaines localisations enregistrées correspondent à ces valeurs. La confirmation par le suivi d'autres individus sur le même site et sur d'autres sites d'étude serait nécessaire.

Analyses des altitudes et des pentes pour les cervidés dans les Vosges

- Les chevreuils

Dans la zone vallonnée des Vosges du Nord, l'altitude moyenne de l'ensemble des localisations est plus élevée que dans le cas des renards à Nancy. Celle-ci est égale à 365 m pour les chevreuils (trois chevrettes). Les écarts-types sont aussi plus importants. L'écart-type pour les altitudes des chevreuils est égal à 20 m. La Figure III.21 représente les altitudes des localisations d'un chevreuil pendant une journée. La moyenne est de 371 m avec un écart-type de 12, un minimum de 332 m et un maximum de 384 m.

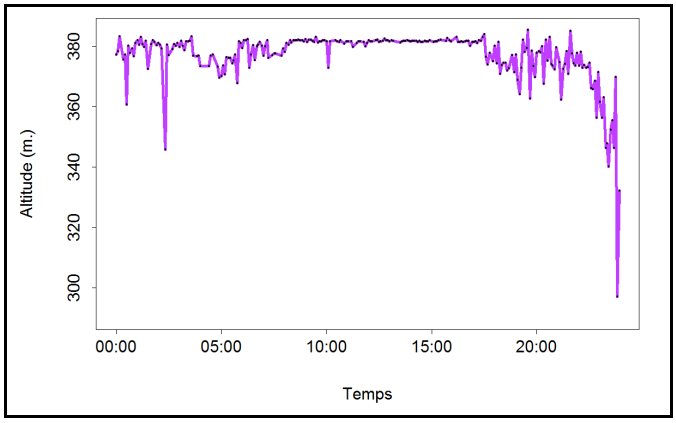


Figure III.21. Les valeurs d'altitudes en fonction du temps correspondant aux localisations enregistrées pendant 24 heures pour un chevreuil en zone forestière vallonnée dans la RNCFS de La Petite Pierre.

Les chemins empruntés lors des déplacements sont a priori influencés par la pente du terrain. Les distributions des pentes (Figure III.22) indiquent que dans un relief vallonné les chevreuils se déplacent beaucoup sur des zones planes. Environ 45 % des localisations des chevreuils se situent sur des pentes douces, inférieures à 5 degrés. L'utilisation des pentes peut être mise en parallèle à leur répartition sur le site d'étude, indiqué en Annexe 4. Les pentes entre 15 et 20 degrés sont les plus fréquentes. Les valeurs entre 5 et 10 degrés sont par ailleurs plus nombreuses que celles entre 0 et 5. Cela tendrait à montrer une préférence marquée des chevreuils pour les pentes très faibles. Nous avons représenté l'histogramme des pentes et celui des altitudes correspondant aux enregistrements des trois chevreuils en Figure III.22.

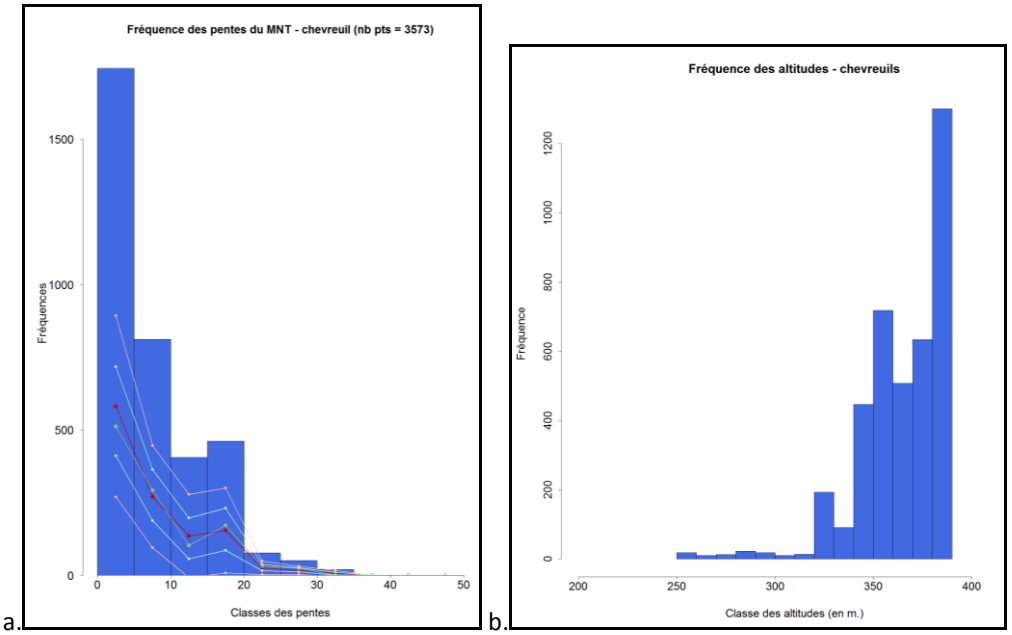


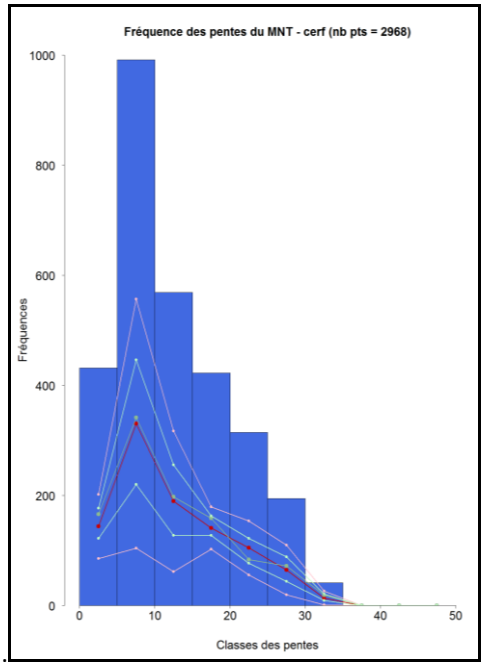
Figure III.22. Description du relief à partir du MNT, correspondant aux coordonnées planimétriques de l'ensemble des localisations des chevreuils dans les Vosges : a) Distribution par classe de valeurs de pente à intervalle de 5°. Les courbes relient les valeurs de moyennes et de quartiles calculées par classe. b) Distribution par classe de valeurs d'altitude de 10 m du MNT des localisations.

Les altitudes pour les chevreuils sont comprises entre 250 et 390 m avec une concentration des localisations entre 350 et 390 m (90 %). Les altitudes du site d'étude sont comprises entre 200 et

440 m, avec des occurrences par classes de valeurs de 10 m relativement similaires (voir en Annexe 4).

- Les cerfs

L'altitude moyenne des localisations pour les cerfs (trois biches) est égale à 295 m. Les cerfs évoluent à des altitudes variées avec un écart-type égal à 40 m. Leurs localisations sont situées pour moitié sur des pentes inférieures à 10 degrés : 15 % d'entre elles sont comprises entre 0 et 5 degrés et 35 % entre 5 et 10 degrés. Compte-tenu de la répartition des pentes sur le site d'étude, les cerfs ne semblent pas montrer une sélection stricte pour des pentes très faibles mais s'accommodent des pentes faibles à moyennes : 90 % des localisations sont situées sur des pentes inférieures à 25 degrés. Les histogrammes des pentes et des altitudes correspondant aux enregistrements sont en Figure III.23.

a. 

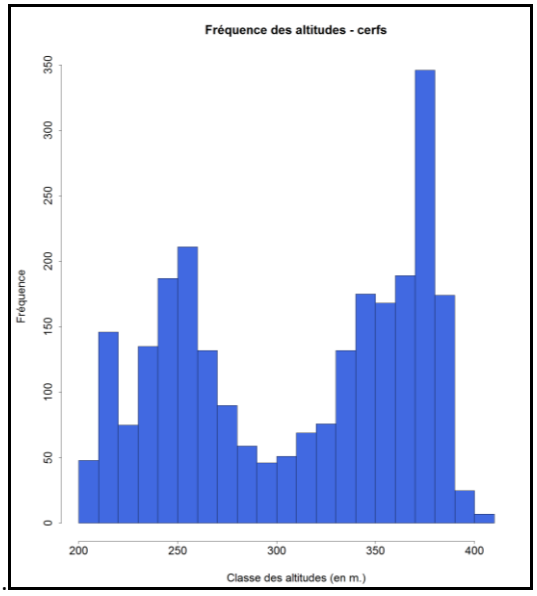
b. 

Figure III.23. Description du relief à partir du MNT, correspondant aux coordonnées planimétriques de l'ensemble des localisations des cerfs dans les Vosges : a) Distribution par classe de valeurs de pente à intervalle de 5° avec des courbes reliant les valeurs de moyennes et de quartiles calculées par classe. b) Distribution par classe de valeurs d'altitude de 10 m du MNT des localisations.

Les altitudes parcourues par les cerfs couvrent un intervalle large entre 200 et 410 m. Deux pics d'occurrence sont observés autour de 250 m et 380 m. Cette répartition inégale des valeurs d'altitudes ne dépend pas des individus car chaque cerf parcourt des zones d'altitudes différentes. Une des biches reste cependant en majorité dans des talwegs qui correspondent à des altitudes inférieures à 350 m (voir la Figure III.24). Dans un talweg, les altitudes s'élèvent fortement de part et d'autre de l'axe du fond de la vallée.

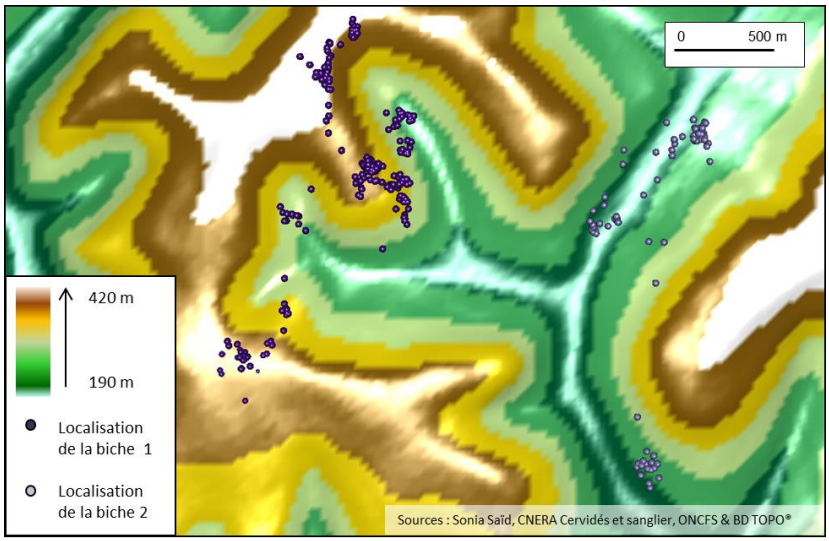


Figure III.24. Les localisations enregistrées pendant 24 heures pour deux biches dans la RNCFS de La Petite Pierre : la biche 1 est située principalement à des altitudes élevées alors que la biche 2 a un domaine vital principalement situé dans un talweg.

- Comparaison entre les chevreuils et les cerfs

L'étude des altitudes et des pentes correspondant aux localisations nous permet de préciser les déplacements caractérisés dans la partie III-1. Les chevreuils se déplacent sur des zones de petite superficie et de pente faible. Cela correspond à des altitudes élevées sur le site d'étude. Les cerfs se situent à des altitudes élevées – relief de type plateau – ou basses – relief de type talweg. En effet, le site est vallonné et les cerfs se déplacent quotidiennement sur de plus grandes distances que les chevreuils. L'écart-type des altitudes est alors plus grand pour les cerfs. Les différences d'altitudes et les pentes que cela représente ne paraissent pas arrêter les animaux dans leurs déplacements quotidiens. Ils empruntent probablement des chemins de pente faible. Les cerfs semblent se déplacer davantage sur des pentes plus élevées que les chevreuils mais avec également une préférence pour des pentes de moins de 10 degrés. Ces résultats semblent cohérents avec la littérature qui indique que les chemins suivis par les cervidés sont généralement les chemins de plus faible pente (Patthey, 2003).

Pour les renards, nous ne pouvons conclure à un évitement de certaines altitudes ou de pentes, étant donné le relief relativement plat des sites d'étude. Pour les chevreuils, les zones parcourues sont plutôt d'altitude élevée entre 350 et 400 m alors que l'altitude maximale dans la RNCFS est de 420 m. Les pentes empruntées sont majoritairement faibles, en-dessous de 5 degrés alors qu'elles ne représentent que 10 % du site d'étude. Les cerfs se déplacent dans des zones d'altitudes diverses, et les pentes parcourues sont surtout comprises entre 0 et 10 degrés, soit un peu plus élevées que pour les chevreuils.

2.1.2. Présence des animaux dans les types d'occupation du sol

Nous cherchons à caractériser les choix des animaux en termes de présence dans les occupations du sol. Nous nous intéressons notamment aux surfaces de végétation et aux surfaces davantage anthropisées comme les zones bâties correspondant à des habitations et à des activités. Les questions concernent :

- la présence préférentielle dans certaines occupations du sol par espèce ;

- l'utilisation des occupations du sol en fonction des activités des animaux : repos et recherche de ressources alimentaires en particulier.

Pour cela, nous calculons les relations d'inclusion et d'exclusion des localisations par rapport aux types d'occupation du sol. Les thèmes du RGE® qui nous intéressent sont le bâti, la végétation, les surfaces hydrographiques et les zones d'activités. Le Tableau III.6 indique les pourcentages des localisations des animaux inclus dans les différents types d'occupation du sol par cas d'étude.

Tableau III.6. Pourcentage des localisations enregistrées inclus dans un objet de 4 thèmes du RGE®. Cas d'étude des renards dans la région de Nancy et des cervidés dans les Vosges du Nord. Le reste des localisations qui ne sont pas incluses dans un de ces thèmes, se situent dans des occupations du sol non couvertes par les spécifications de la BD TOPO®.

cas d'étude (département)	bâtiment	zone arborée	surface hydrographique	zone d'activités
renard (dép. 54)	2 %	49 %	0 *(1 localisation)*	20 %
chevreuil (dép. 67)	0	99 %	0	0
cerf (dép. 67)	0	96 %	0	0

La présence des animaux dans les bâtiments n'est pas un indicateur pertinent pour déterminer une préférence particulière car ceux-ci sont majoritairement hermétiques aux traversées. Toutes les localisations sont situées en dehors des bâtiments, à 15 exceptions près sur un total de 675 enregistrements dans le cas des renards à Nancy. Il s'agit vraisemblablement d'imprécisions de localisation, la précision des coordonnées GPS étant estimée dans ce cas à 20 m. Nous utilisons par contre la délimitation de zones bâties qui sont couvertes par des bâtiments de différentes fonctions, comme des bâtiments industriels ou à vocation commerciale. Cela correspond aux zones d'activités, qui ne sont présentes que sur le site d'étude de Nancy en milieu périurbain. Ces zones recouvrent des activités diverses : administration, culture et loisirs, enseignement, gestion des eaux, industrie et commerce, santé, sport, transport (IGN, 2008). 20 % des localisations y sont incluses. Il s'agit d'espaces verts, de terrains de sport et de casernes militaires. Concernant l'hydrographie, aucune présence des animaux n'est révélée par les données. Les relations d'inclusion avec les surfaces d'eau sont nulles dans les trois cas d'étude présentés. Il nous semble pertinent de se concentrer sur la végétation. La végétation dans le RGE® concerne principalement le couvert arboré. Nous présentons l'analyse des résultats par cas d'étude.

La présence des renards dans le couvert arboré de l'agglomération de Nancy

Sur la zone d'étude des renards autour de Nancy, les informations sur les types d'essences composant les massifs forestiers importants sont disponibles à partir de la Carte Forestière version 1, mais ces massifs sont peu parcourus par les animaux suivis. Nous utilisons les données du RGE® sur les zones arborées non distinguées en essences qui sont définies à une échelle spatiale plus grande (surface minimale représentée de 500 m²) que la Carte Forestière v 1 (surface minimale représentée de 22 500 m²). Pour l'ensemble des renards, 49 % des localisations se trouvent dans des zones arborées. Si l'on distingue les individus, la composition de l'espace incluant les localisations est différente. Les deux individus (1 et 4) dont les localisations ont été enregistrées dans un milieu densément urbanisé se situent moins dans les zones arborées (33 % et 43 % des localisations concernées) que les deux individus (3 et 2) observés en périphérie ou à l'extérieur du centre urbain (61 % et 65 % des localisations concernées). Si l'on considère la composition des sites d'études restreints à chaque renard (rectangle englobant par individu), on constate que la superficie couverte par des zones arborées

est proportionnellement plus importante dans les deux zones en périphérie : 39 % de couvert arboré contre 31 % en moyenne dans les deux sites les plus urbanisés. Cela peut expliquer la présence plus marquée des animaux dans les surfaces arborées en périphérie, même si la différence entre les proportions des localisations dans la végétation est moins grande que la différence entre les proportions de la végétation dans les sites d'étude. Les zones arborées en milieu densément urbanisé sont plus petites et fragmentées (2500 m² de superficie moyenne et une densité de 150 zones arborées au km²) qu'en périphérie où il s'agit de bois (10 000 m² de superficie moyenne et une densité de 90 zones arborées au km²). Nous pouvons supposer que les renards se déplacent beaucoup à l'intérieur des bois en périphérie d'agglomération. Ils se situent également dans les zones arborées en milieu urbanisé dense même si cette présence est moins prononcée que dans les bois pour les individus en périphérie. Nous étudierons en III-2.1.3 la distance à la végétation afin de voir si cet effet est compensé par une proximité avec de petites zones arborées. Nous illustrons en Figure III.25 la différence de couverture par la végétation arborée entre le renard 4 suivi en milieu périurbain dense et un renard 2 suivi à la périphérie de zones bâties.

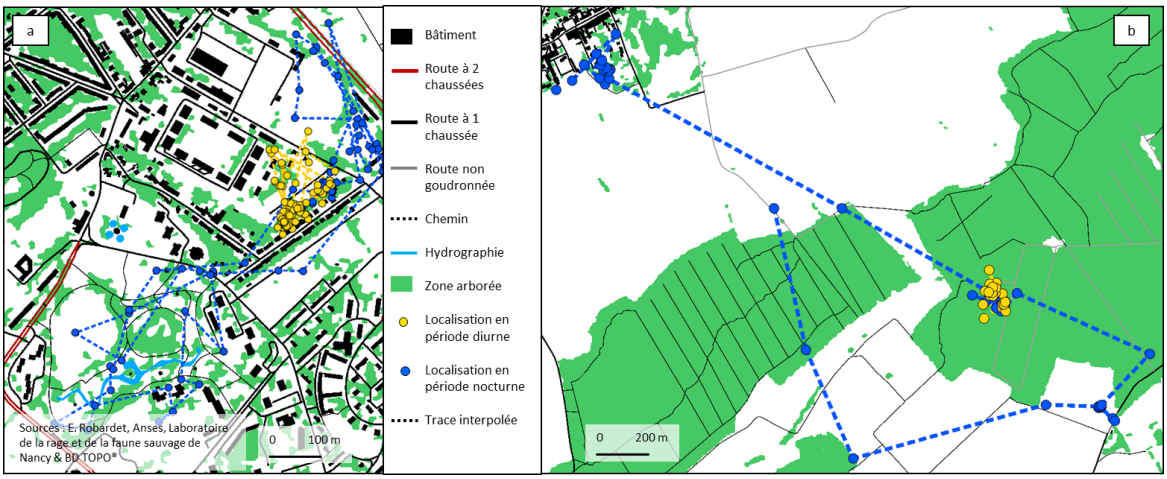


Figure III.25. Carte des localisations GPS de deux renards dans deux types d'espace : a) dans un site périurbain densément bâti en banlieue de Nancy, b) en périphérie d'agglomération. La couverture par la végétation de ces sites est différente en termes de surface et de fragmentation.

Nous pouvons tenter de comprendre l'exploitation du couvert arboré par les animaux en utilisant les rythmes de déplacements. L'étude des différences de rythmes en relation avec l'occupation du sol a pour but d'émettre des hypothèses quant aux types d'utilisation des éléments du paysage. L'automatisation de la caractérisation de ces types d'utilisation passe par l'identification des pauses et des déplacements rapides ainsi que par la détection des relations d'inclusion ou d'exclusion par rapport aux éléments. Dans la zone périurbaine de Nancy, l'éclatement du couvert forestier permet de déterminer quels éléments de couvert arboré sont parcourus par les renards. Le rythme de déplacement renseigne sur le temps passé dans cette occupation du sol et permet d'estimer le type d'activité comme la recherche de nourriture ou le repos. Compte-tenu de la taille de l'échantillon, nous nous sommes concentrée sur l'analyse des comportements individuels. La Figure III.25 montre deux exemples de différences de localisations entre période diurne et période nocturne. Pendant la journée, les localisations des deux individus différents sont regroupées dans une surface restreinte alors que les localisations nocturnes correspondent à des déplacements longs. Cela est cohérent avec la distinction entre le repos pendant le jour, et la recherche de nourriture la nuit. Nous avons extrait en Figure III.26 des localisations pendant un intervalle de temps restreint et nous avons représenté les zones arborées.

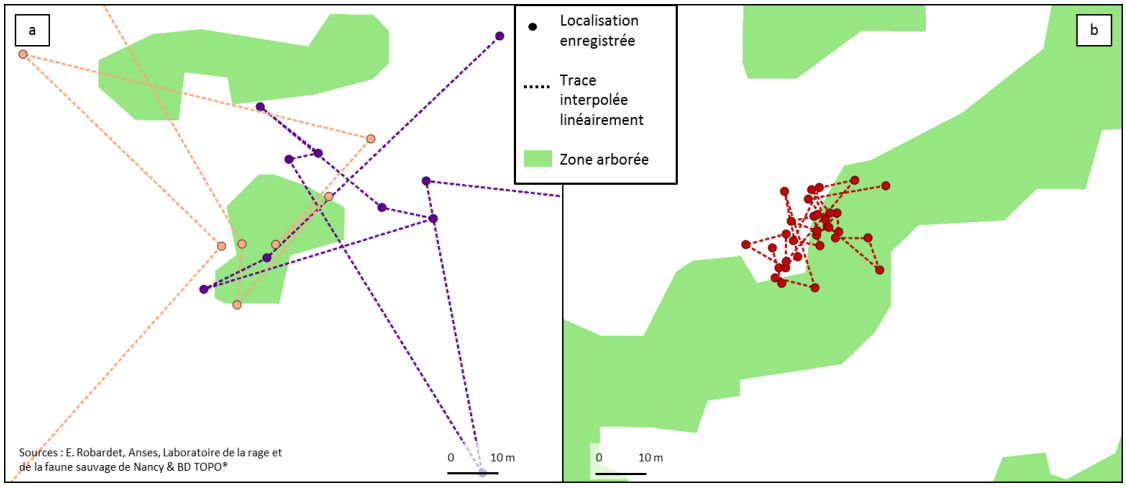


Figure III.26. Étude de l'inclusion des localisations de renards dans les surfaces de végétation arborée en lien avec le rythme de déplacement : a) deux déplacements pendant 45 min, b) un déplacement pendant 3 h.

L'extrait en Figure III.26.a est à mettre en correspondance avec la Figure III.16 dans la partie III-1.4.2 sur l'identification des pauses et des déplacements rapides d'un individu pendant 24 heures. Les localisations sélectionnées correspondent à deux intervalles de temps de 45 minutes en début de soirée et au milieu de la nuit. Elles ont été identifiées précédemment comme des pauses. L'extrait en Figure III.26.b concerne un autre individu pendant une durée de 3 heures en milieu de matinée. La fréquence des relevés est en moyenne de 5 min. Les distances parcourues dans l'extrait (a) sont plus importantes que dans l'extrait (b). En (a), le parcours de la zone arborée au centre de la figure s'effectue à deux moments distincts de la journée et les deux durées de temps effectivement passées dans cette zone sont inférieures à 20 minutes. Ceci amène à caractériser l'exploitation de cet élément du paysage comme temporaire lors de déplacements rapides, soit comme un lieu de protection soit comme un lieu contenant des ressources. Le temps passé est court (moins de 20 min), ce qui ne correspond pas à une activité de repos mais plutôt à un comportement de recherche. Les distances parcourues dans l'extrait (b) sont faibles, en moyenne de 6 m toutes les 5 min. On peut penser également qu'il s'agit d'imprécisions de mesure et que l'animal reste statique. L'utilisation pendant la période diurne de l'élément arboré est probablement celle d'un gîte de repos.

Les cervidés parcourant un milieu forestier dans les Vosges

La RNCFS de La Petite Pierre possède un taux de couvert forestier de 98 %. La plupart des localisations enregistrées des cervidés sont incluses dans un objet correspondant à de la végétation arborée. L'utilisation des zones arborées peut être précisée selon les deux espèces chevreuil et cerf, et en s'appuyant sur les informations des bases de données géographiques. Concernant les cervidés, nous avons exploité la distinction entre les essences forestières principales. Les animaux se trouvent dans les types suivants : en forêt fermée de conifères, en forêt fermée de feuillus, en forêt mixte, en dehors du couvert forestier, comme illustrée en Figure III.27. La distinction par individus est montrée en Annexe 5.

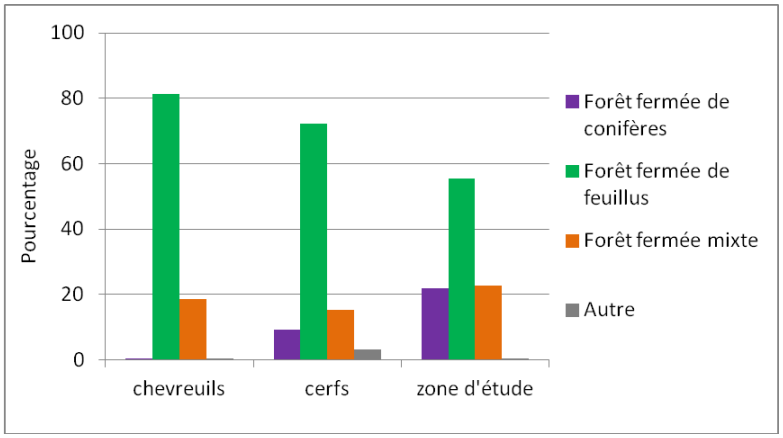


Figure III.27. Les pourcentages des types de forêt dans le cas d'étude de la RNCFS de La Petite Pierre pour les localisations des chevreuils, pour les localisations des cerfs et sur l'ensemble du site. Les situations des animaux suivis dans les types d'essence principale ne sont pas directement proportionnelles à la composition du site.

- Les chevreuils

99 % des localisations des chevreuils sont situés dans un couvert arboré, comme indiqué dans le Tableau III.6. Les individus ne s'écartent guère du massif forestier. La comparaison avec la composition du site d'étude met en évidence une certaine préférence dans la fréquentation des forêts fermées avec une majorité de feuillus, correspondant à 81 % des localisations, et des forêts fermées mixtes correspondant à 18 % des localisations.

- Les cerfs

Pour les cerfs, 96 % des localisations se situent dans la forêt. Quelques localisations sont enregistrées en dehors de la végétation arborée, elles correspondent à la fréquentation d'une clairière. Les cerfs semblent privilégier les forêts de feuillus même s'ils sont présents dans les forêts de conifères.

- Comparaison entre chevreuils et cerfs

Le RGE® contient une typologie agrégée des essences forestières qui est malgré tout instructive. Les cerfs et surtout les chevreuils semblent préférer les zones de feuillus dominants dans un milieu de forêt fermée, ce qui est cohérent avec les connaissances sur la composition de leur alimentation (ONCFS, 2007). La composition en essences ligneuses et semi-ligneuses n'est pas détaillée dans la base. La préférence de situation des cervidés suivis peut aussi être due à une sélection alimentaire plus précise que le type général de l'essence majoritaire, ou encore à des interactions avec les autres individus. Par exemple, on sait que les chevreuils consomment des essences semi-ligneuses comme la ronce ou l'aubépine (ONCFS, 2007) et que le cerf consomme beaucoup d'herbacées (Bouquier, 2003). La base Carte Forestière version 2 décrit les essences de feuillus et de conifères de manière plus détaillée que la BD TOPO®, avec par exemple une distinction entre chêne et hêtre ou encore entre les sapins, les épicéas et les autres conifères. Nous utiliserons cette distinction par la suite dans l'étude du voisinage des localisations dans la partie III.2.2.

La présence des animaux dans le thème d'occupation du sol de végétation arborée peut être caractérisée selon les cas d'étude. Les résultats dépendent également de la précision des données. Les renards ont une exploitation différente du couvert arboré en milieu périurbain : comme gîte de repos ou comme lieu parcouru lors de leur recherche de ressources. En ville, la diversité est dans la superficie des zones arborées. Il peut s'agir de grands parcs boisés ou alors de bosquets dans des jardins. En milieu forestier, nous constatons une majorité de localisations des chevreuils et des cerfs dans les forêts avec une dominance de feuillus, puis dans les forêts mélangées. Les cerfs suivis sont également un peu présents dans les forêts de conifères. Les clairières les plus importantes sont prises en compte, cependant des taux de couvert arboré variables peuvent être considérés de la même manière dans les bases de données. Par exemple, les bords des routes forestières correspondent souvent à une lisière forestière moins dense que la forêt.

2.1.3. Analyse de la proximité des animaux aux éléments du paysage

Suite à la caractérisation de la présence des animaux dans les occupations du sol, nous souhaitons quantifier leur proximité à ces mêmes occupations du sol. Nous avions laissé de côté dans la partie précédente les infrastructures de transport car la caractérisation de la proximité à celles-ci est plus pertinente que la caractérisation de présence sur des voies a priori très fugace et difficilement enregistrée. Nous traitons également des thèmes du bâti, ce qui va nous permettre d'identifier la situation des animaux par rapport aux constructions. La végétation arborée est également prise en compte : les relations d'inclusion peuvent être enrichies par l'analyse des relations de proximité. Nous proposons de calculer les distances entre les relevés et les éléments du paysage. Le calcul de distance est notamment intéressant lorsque la modélisation des éléments du paysage n'est pas surfacique ou que ces éléments, comme par exemple les bâtiments, ne sont pas traversés par la faune sauvage. Cela permet aussi de lisser les imprécisions de localisation, autant pour les points GPS que pour les éléments du paysage dont la délimitation est délicate comme les zones arborées. Plusieurs distances euclidiennes sont considérées :

- la distance minimale entre la localisation ponctuelle et l'élément du paysage le plus proche par thème d'occupation du sol ;
- la distance moyenne entre la localisation et l'ensemble des éléments d'un thème d'occupation du sol dans une zone définie.

Pour les éléments du paysage modélisés par des surfaces et par des lignes, l'emplacement du contour ou du trait le plus proche de la localisation est utilisé, et non le centre de gravité du polygone (voir le schéma explicatif en Figure III.30 dans le chapitre II-3.3.1). Les distances moyennes entre chaque localisation et l'ensemble des objets d'un thème dans une zone de référence ont aussi été mesurées. Ces distances présentent toutefois un intérêt moindre car elles dépendent fortement de la zone de référence qui peut être le domaine vital, le rectangle englobant ou une autre délimitation.

La distance aux éléments du paysage des renards dans l'agglomération de Nancy

Nous avons calculé les distances minimales entre chaque localisation et les thèmes du RGE®. Les distances minimales sont représentées sur le graphe de la Figure III.28 pour deux renards (2 et 4) dans deux types de sites différents, en milieu périurbain et en milieu urbain dense. Nous avons associé une interprétation des activités des individus selon les types de déplacement. Les thèmes qui nous ont paru intéressants sont les bâtiments (habitations), les routes et les chemins, les zones arborées et les cours d'eau. Le réseau des routes et des chemins est

reconstruit au préalable selon les relations topologiques. Certains tronçons sont ainsi fusionnés afin de conserver la continuité du réseau.

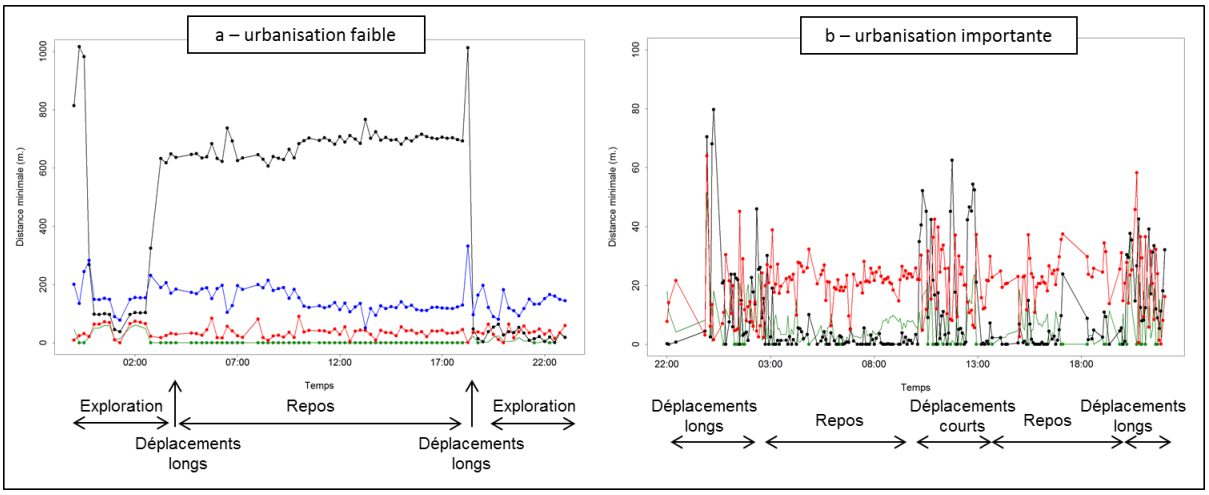


Figure III.28. La distance minimale entre chaque localisation et les thèmes géographiques en fonction du temps. Exemple sur les thèmes du bâti (en noir), du réseau routier (en rouge), de la végétation (en vert) et des cours d'eau (en bleu) pour deux renards pendant 24 h : a) dans une zone en périphérie de Nancy, b) en zone densément urbanisée dans la banlieue de Nancy. Le graphe (a) prend en compte les distances de 0 à 1000 m et le graphe (b) de 0 à 100 m. Les cours d'eau ne sont pas représentés dans (b) car ils sont tous situés au-delà de 1000 m de ce renard.

La représentation des distances minimales peut être interprétée comme les éléments topographiques les plus proches, vus à partir des localisations. Elle permet de mettre en évidence les variétés des environnements spatiaux dans lesquels se déplacent les individus. Ceci implique des appréhensions des éléments du paysage différents. Le premier individu (renard 2 en Figure III.28.a) est peu soumis à la présence d'habitations lors de la période diurne. Cette période correspond à sa présence dans une zone forestière, proche de routes peu fréquentées et loin des zones urbanisées. La période nocturne correspond par contre à une zone d'habitations avec un réseau routier plus dense et des zones arborées fragmentées. Le second individu (renard 4 en Figure III.28.b) vit dans une zone densément urbanisée. La variation des distances minimales aux éléments topographiques est liée aux rythmes de déplacements. Les périodes de déplacements intenses sont associées à une variation importante par rapport aux bâtiments et aux routes : autour de 23 h, de midi et de 20 h. Les périodes entre 3 h et 10 h et entre 13 h et 19 h correspondent par contre à moins de déplacements : le renard parcourt des distances faibles et reste longtemps aux mêmes endroits proches des habitations et de la végétation en moyenne à plus de 20 m des routes. La correspondance entre les types de déplacements et la variation des distances aux éléments du paysage est aussi constatée pour les suivis des deux autres renards, même si l'identification des rythmes de déplacements par l'environnement spatial peut être moins nette. L'interprétation nécessite néanmoins une cartographie de l'ensemble des thèmes afin d'éviter les erreurs dues à une sélection trop restrictive des objets les plus proches.

La Figure III.29 représente les histogrammes des localisations d'un renard (même individu et même jour qu'en Figure III.28.b) en fonction des classes de distances minimales aux éléments topographiques. Ils confirment les observations précédentes sur la proximité de ce renard aux habitations et aux zones arborées et son relatif éloignement aux routes. Ces graphiques illustrent aussi le fait que la distance minimale moyenne reste un indicateur. Pour ce renard, les classes de distances aux bâtiments vont jusqu'à 105 m alors que celles des voies vont jusqu'à 75 m, montrant que le renard peut se retrouver dans des endroits éloignés des habitations.

Pourtant, sa distance minimale moyenne aux bâtiments (24 m) est plus petite que celle aux voies de communication (31 m), ce qui correspond à l'ordre inversé par rapport à l'ensemble des renards suivis (voir le paragraphe suivant). 36 % des localisations sont situés à moins de 20 m des bâtiments, 21 % à moins de 20 m des voies et 95 % à moins de 20 m d'une zone arborée.

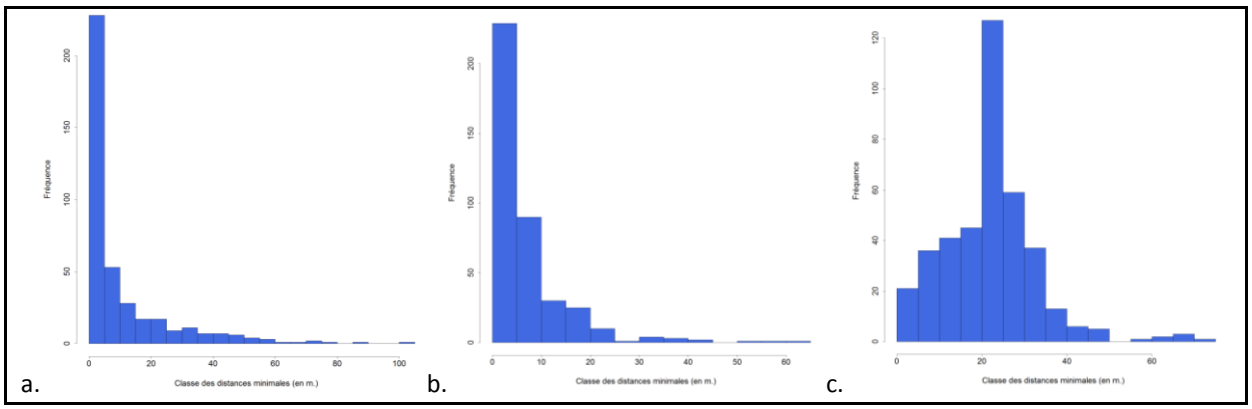


Figure III.29. Fréquences des distances minimales : a) aux bâtiments, (b) aux zones arborées et (c) au réseau viaire, pour un renard pendant 24 h. Les classes de distances sont de 5 m.

Pour les quatre renards suivis, les distances minimales sont en moyenne de 28 m par rapport aux routes, de 35 m aux bâtiments (sauf le renard 2 représenté en Figure III.28.a pour lequel la moyenne est à plus de 450 m), de 8 m aux zones arborées et de 700 m aux cours d'eau mais avec de fortes variations entre les individus. Un seul renard se déplace à proximité d'une voie ferrée en période nocturne. Pendant 12 heures, 21 % de ses localisations sont situées à moins de 20 m des voies, et 46 % à moins de 50 m ce qui représente alors presque la moitié du temps passé.

La distance aux éléments du paysage des cervidés dans les Vosges

Les données sur le réseau des voies dans les Vosges comprennent différents types : grands axes routiers, routes secondaires, voies cyclables, chemins et sentiers d'accès piétonniers. Par la suite, nous distinguons ces types. Dans la RNCFS de La Petite Pierre, les voies de communication sont des chemins, des sentiers, des routes non goudronnées et des routes à une chaussée. La réserve est néanmoins majoritairement desservie par des chemins qui représentent plus de la moitié du réseau. Toutes les voies sont réservées à une pratique piétonnière sauf autorisation. Il est pourtant intéressant de les distinguer car le revêtement des voies n'est pas le même. Le revêtement des routes à une chaussée est goudronné. Les routes non goudronnées, les chemins et les sentiers correspondent à du sol plus ou moins aménagé pouvant être recouvert d'herbe. Les types de voies de communication sont également associés à une ouverture du milieu plus ou moins importante. Les routes à une chaussée sont plus larges que les chemins et elles représentent une plus grande coupure dans la végétation arborée. Nous avons calculé les distances minimales aux localisations par types de voie et par individu des deux espèces de cervidés. Le Tableau III.7 résume les résultats par espèce. Le détail par individu est présenté en Annexe 6. À partir des distances minimales, nous estimons si les animaux se tiennent en moyenne près des voies, ce qui dans ce cas peut être intéressant pour observer les animaux et effectuer des opérations de suivi.

Tableau III.7. Les moyennes des distances minimales entre les localisations et les types de voies de communication pour les trois chevreuils et pour les trois cerfs.

espèce	sentier	chemin	route non goudronnée	route à 1 chaussée	toutes les voies indifférenciées
chevreuil	623	70	315	281	44
cerf	575	59	92	262	28

La distance minimale moyenne des animaux varie en fonction du type des voies de communication réparties de manière différente sur le site. Les animaux sont plus proches des chemins, que des routes non goudronnée, des routes à une chaussée et des sentiers. Quel que soit le type de voie, les cervidés se situent en moyenne à proximité de leur tracé : la distance minimale moyenne est de 44 m pour les chevreuils et de 28 m pour les cerfs. Ces valeurs sont relativement faibles par rapport aux distances pour chaque type de voie considéré séparément. Cela peut s'expliquer par le fait que les différentes voies sont éloignées entre elles : un animal peut se tenir à proximité d'un chemin, qui est à plusieurs dizaines de mètres de la route goudronnée la plus proche. La Figure III.30 est la cartographie des voies de communication du site d'étude ainsi que des zones à moins de 20 m et à moins de 50 m de ces voies. Respectivement pour les chevreuils puis les cerfs, 23 % et 44 % des localisations sont à moins de 20 m de voies, et 61 % et 87 % à moins de 50 m.

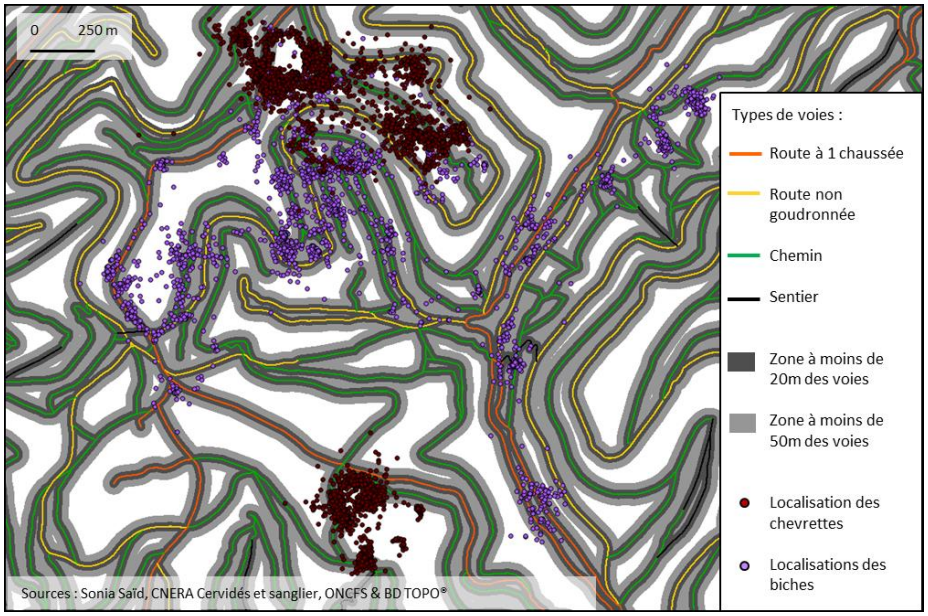


Figure III.30. Les localisations des cervidés dans la RNCFS de La Petite Pierre, les voies de communications du site et les zones situées à moins de 20 m et à moins de 50 m de ces voies.

L'attraction potentielle des voies de communication est particulièrement observée pour les cerfs, surtout vis-à-vis des chemins et des routes non goudronnées. Quelques localisations sont enregistrées dans des clairières (cf. III-2.1.2), ce qui tend à montrer qu'en milieu forestier, cette espèce apprécie les milieux ouverts comme indiqué dans Bouquier (2003) et Krojerova-Prokesova *et al.* (2010). Les chemins et les routes correspondent souvent à des pentes faibles, ce qui facilite les déplacements en relief vallonné. Ces voies correspondant également à une ouverture de la végétation qui peut être bénéfique pour la faune notamment en milieu forestier. Certaines essences végétales peuvent donc y être présentes, comme des essences de lisières intéressantes pour le chevreuil ou de l'herbe appréciée par le cerf.

Pour les renards en milieu périurbain, les localisations à moins de 20 m des éléments du paysage représentent 38 % pour les bâtiments, 90 % pour les zones arborées et 31 % pour les routes. La proximité des renards est donc surtout importante vis-à-vis des zones arborées en milieu périurbain, proximité vérifiée le long d'un gradient d'urbanisation de faible à dense. Les individus peuvent se tenir à proximité des bâtiments (emplacement d'un gîte, présence de nourriture), ce qui va dans le sens de l'adaptabilité d'une espèce généraliste telle que le renard. Les voies de communication semblent jouer un rôle d'obstacle : les individus se tiennent plutôt éloignés de celles-ci. Il est possible qu'ils les longent puis qu'ils les traversent rapidement si besoin.
Dans la RNCFS de La Petite Pierre, nous n'avons pas inclus le thème de la végétation arborée dans la caractérisation de la proximité des animaux car ceux-ci se situent en large majorité dans la forêt. Nous constatons que les cervidés se tiennent à proximité des voies de communication, qui sont réservées à la circulation piétonne, goudronnées ou non : 23 % des localisations des chevreuils et 44 % des localisations des cerfs sont situées à moins de 20 m des voies – routes ou chemins. Les cerfs se déplacent particulièrement à proximité des voies, ce qui peut indiquer une préférence de cette espèce pour les zones planes et en milieu ouvert en forêt.

2.1.4. Les éléments du paysage traversés

Nous nous intéressons aux chemins empruntés par les animaux même si ces chemins ne sont pas connus exactement. Notre objectif est d'analyser l'espace entre les localisations et de tenter de le caractériser en estimant quels sont les éléments parcourus lors des déplacements. Pour cela, nous utilisons les traces linéaires interpolées (la trace est le tracé géométrique de la trajectoire qui contient en plus les informations temporelles), alors que dans les parties précédentes, les calculs de distances concernaient les localisations ponctuelles. Cette analyse permet d'évaluer la présence potentielle d'éléments du paysage rencontrés lors des trajets et d'émettre des hypothèses sur leur influence dans les choix de déplacements. La méthode adoptée s'appuie donc sur les traces linéaires et sur la description de l'espace par les thèmes du RGE®. Les objets que la trace croise sont dénombrés par segment de cette trace.

Les éléments traversés par les renards dans l'agglomération de Nancy

- Superposition des traces aux éléments du paysage et étude de leur proximité

Nous ne savons a priori pas quelles données du RGE® sont à prendre en compte pour comprendre les déplacements. Nous représentons en Figure III.31 les objets de l'espace croisés par la trace linéaire interpolée à partir des localisations connues. Rappelons que la trace linéaire est une approximation des chemins réels. En toute logique, les bâtiments intersectés ne sont pas traversés mais contournés ou longés, mais l'on ignore par quels détours. Les endroits de traversées des routes ne sont pas identifiés précisément avec cette méthode, il est néanmoins possible d'évaluer le nombre de croisements entre la trace et les voies de communication (chemins, routes, voies ferrées). Les éléments topographiques contenant une partie de la trace sont extraits. Les zones arborées doivent en particulier être considérées différemment car leurs superficies varient beaucoup, de 0,01 ha à 74 ha dans le cas de la Figure III.31.

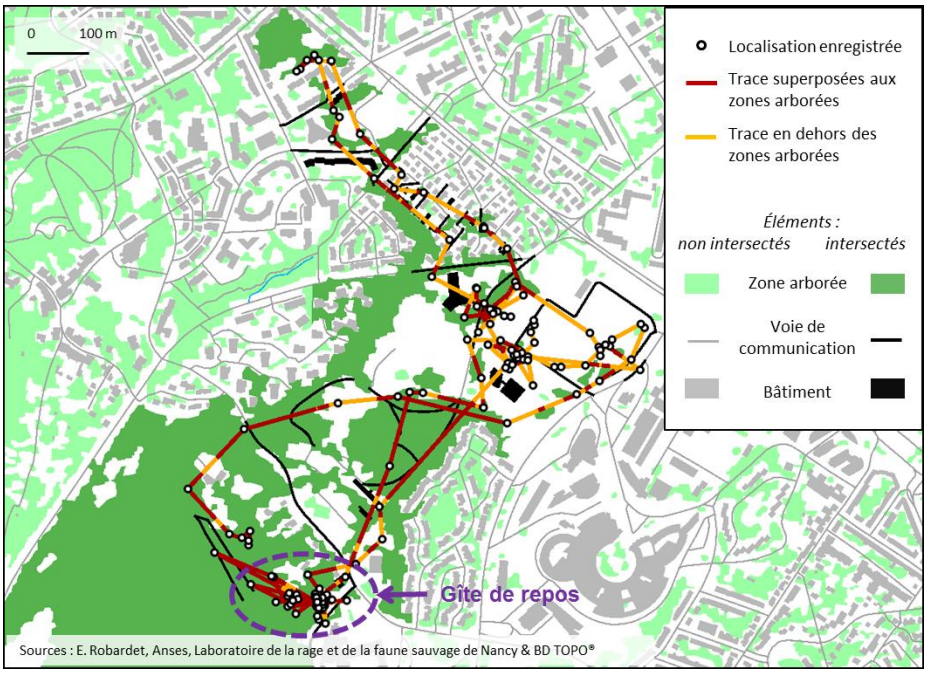
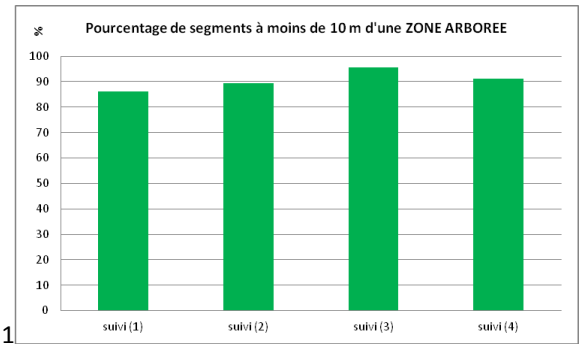


Figure III.31. Cartographie des zones arborées, des voies de communication et des bâtiments du RGE® qui sont croisés par la trace linéaire interpolée d'un renard pendant 24 h. Aucun cours d'eau n'est croisé.

Pour le renard 3 représenté en Figure III.31, la trace d'une journée de suivi se superpose à 53 % aux zones arborées. Ce résultat tend à montrer que dans cette configuration, les zones arborées jouent un rôle de corridors boisés traversés ou longés par les renards. Ce pourcentage prend aussi en compte les localisations proches les unes des autres situées dans ou aux alentours du gîte de repos dans le bois au sud de la carte.

Afin d'étudier la proximité entre trace et éléments du paysage, nous élargissons la trace linéaire des déplacements d'une largeur de 10 m de part et d'autre, ce qui rend la trace surfacique avec 20 m de largeur. Cette largeur correspond à l'imprécision moyenne de localisation du GPS. Le nombre de superpositions entre traces surfaciques et éléments du paysage est calculé pour les quatre renards suivis à Nancy pendant des périodes de 24 h. Nous avons représenté en Figure III.32 le pourcentage de segments de la trace qui se situent ainsi à moins de 10 m de différents éléments du paysage.

a.1



a.2

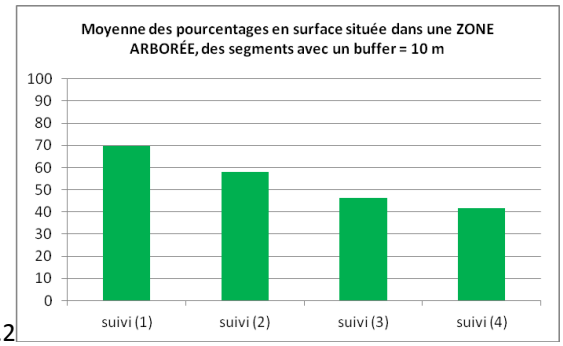
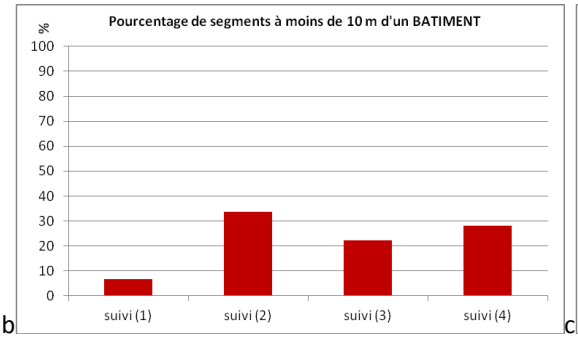


Figure III.32. Pourcentage de segments de la trace linéaire situés à moins de 10 m des éléments topographiques, par suivis de renards près de Nancy pendant 24 h. Trois renards sont concernés car les suivis (3) et (4) correspondent au même individu (renard 4). Les résultats pour le renard 1 suivis pendant 12 h ne sont pas montrés. a.1) Considération des zones arborées. a.2) La moyenne des pourcentages des segments surfaciques inclus dans des zones arborées.

b 

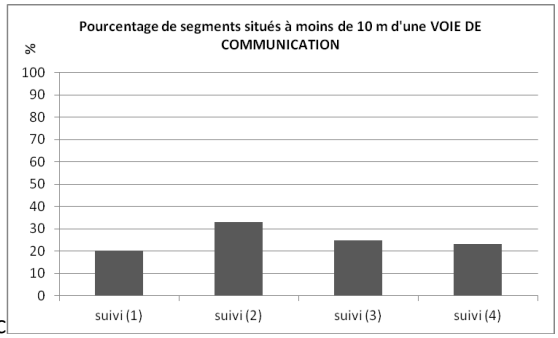
c 

Figure III.32. b) Considération des bâtiments et c) des voies de communication.

En moyenne pour les quatre renards, le pourcentage de segments croisant une zone arborée est égal à 91 %, un bâtiment à 23 % et une voie de communication à 25 %. Si l'on différencie les voies de communication selon leur type, environ la moitié des intersections concerne les routes à 1 chaussée. Les sentiers et les chemins représentent 35 % des intersections. La traversée d'une autoroute est observée pour un individu à deux reprises, en sens aller à 2 h du matin et en sens retour par rapport aux lieux de présence habituels 50 minutes après. En perspective, ces résultats seraient à pondérer avec la longueur des segments. Pour la végétation, nous avons considéré le pourcentage des traces surfaciques inclus dans les zones arborées (Figure III.32.a.1). Le pourcentage moyen pour les quatre suivis est de 54 %, ce qui signifie qu'en moyenne, chaque segment élargi de 10 m est compris dans une zone arborée pour un peu plus de sa moitié. Cela relativise la proximité des déplacements par rapport aux zones arborées.

- Estimation des traversées des voies de transport

Afin de préciser les traversées des voies de communication, nous proposons d'utiliser la carte topologique les décrivant. La carte topologique représente les relations topologiques des routes et des chemins. Un extrait de cette carte est montré Figure III.33 et en Annexe 8. Son processus de construction est celui d'un graphe planaire. Cette carte est constituée de nœuds, d'arcs et de faces. Les tronçons initiaux sont fusionnés afin de garder une continuité entre chaque nœud. Le lien entre les arcs initiaux et les arcs résultants est conservé. L'arc résultant peut alors être associé à plusieurs valeurs attributaires. Dans nos analyses des déplacements, nous avons attribué à l'arc résultant les valeurs attributaires correspondant au tronçon initial le plus long. Nous utilisons la carte topologique afin d'estimer le nombre minimal de traversées des voies que les individus doivent effectuer lors de leurs déplacements. L'exploitation des faces nous permet de déterminer pour chaque segment interpolé si deux localisations successives se situent dans une même face, comme visualisé en Figure III.33. Si c'est le cas, nous estimons que les animaux n'ont pas eu besoin de traverser de voies. Si deux localisations successives se situent dans deux faces topologiques différentes, nous comptons le nombre de faces nécessaires à parcourir entre les deux et donc le nombre minimal d'arcs à traverser. La justesse de l'estimation du nombre de traversées nécessaires des voies par les renards dépend aussi de l'intervalle de temps entre les localisations. Si la fréquence est grande, alors le chemin réellement emprunté a une grande probabilité d'être proche de la trace linéaire. Si la fréquence des localisations est faible, les interprétations sont délicates. Par exemple, en Figure III.33, l'intervalle de temps entre la localisation (1) et (2) est de 5 min avec un nombre minimal de traversée minimal égal à 2. Entre les localisations (2) et (3), aucune traversée n'est nécessaire. L'intervalle de temps entre les localisations (3) à t+10 min et (4) à t+35 min, est par contre de 25 min pour un nombre minimal de traversées également égal à 2. Dans ce second cas, il est possible que ce nombre soit sous-estimé car le renard a pu effectuer des détours, même s'il a bien dû traverser au moins 2 voies. Les voies traversées entre les localisations (6) et (7) puis entre (7) et (8) sont probablement des

sentiers (situés dans un espace vert), alors que les voies précédemment traversées étaient des routes à 1 chaussée.

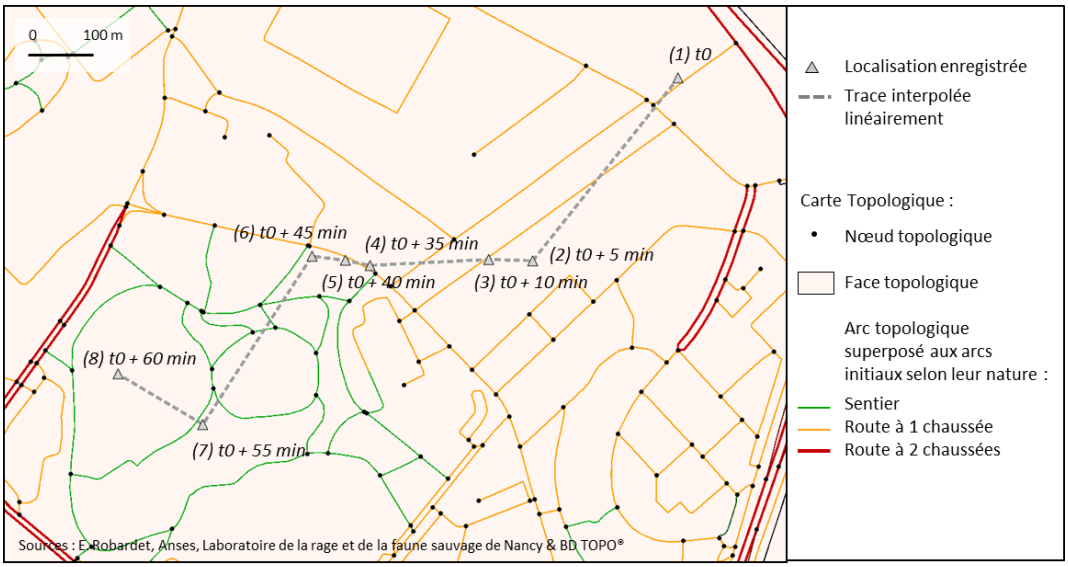


Figure III.33. Extrait de la carte topologique des voies de communication et trace linéaire interpolée à partir de localisations d'un renard enregistrées pendant 1 h. Entre la localisation (1) et la localisation (2), le nombre minimal de traversées de voies est de 2. Entre la (2) et la (3), aucune traversée n'est nécessaire.

Nous estimons le nombre de traversées à partir des relations topologiques des routes et des chemins. Cette méthode repose sur la détermination du nombre minimum de traversées entre deux localisations à partir du graphe des voies. Nous avons distingué les voies de communication selon leur type, comme illustré en Figure III.34. Les individus parcourent des zones avec des densités de voies différentes. Dans les espaces parcourus englobant les localisations, les voies sont majoritairement à une chaussée, puis ce sont les sentiers les plus nombreux (Figure III.34.b).

a.

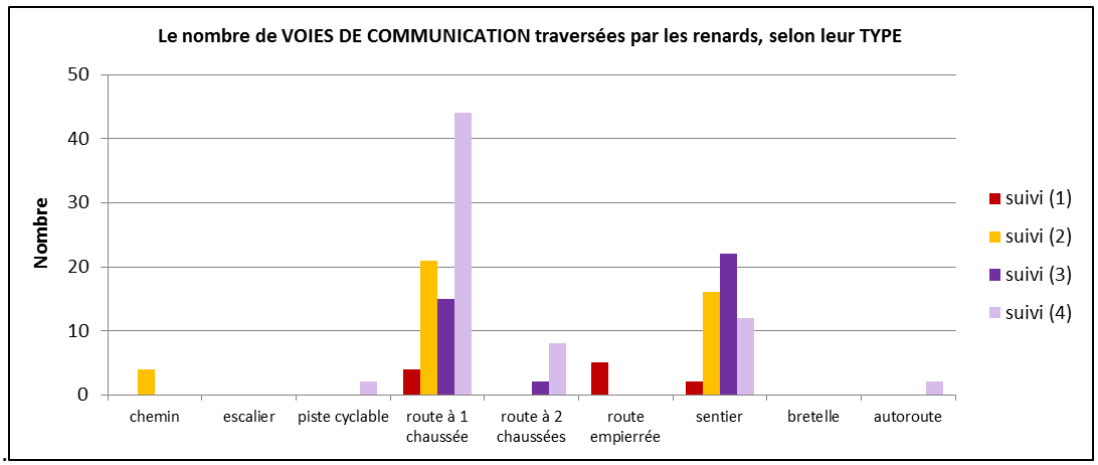


Figure III.34. Comparaison entre les types de voies de communication traversées par les renards et celles présentes dans leurs sites respectifs. a) Nombre de traversées minimales estimées à partir de la carte topologique des voies.

b.

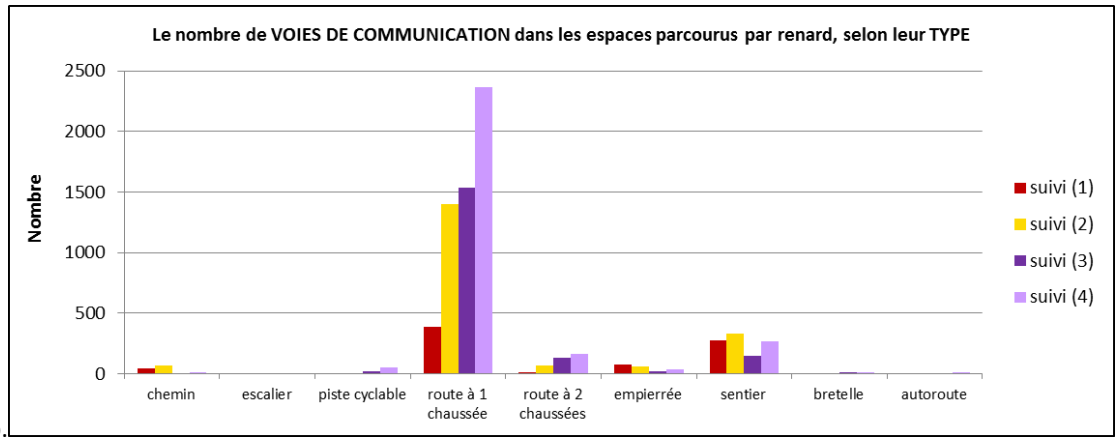
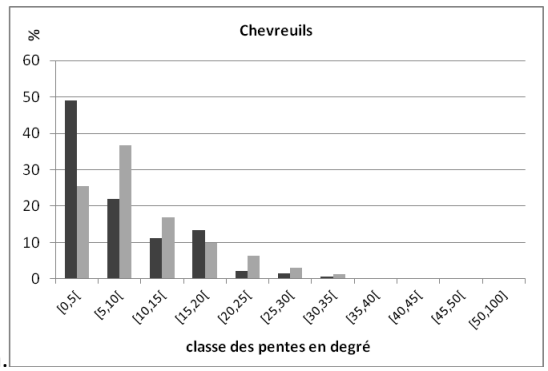


Figure III.34. b) Nombre de voies de communications dans les sites des renards. Les quatre suivis se sont déroulés pendant 24 h sur trois renards, les deux derniers concernant le même individu.

Le nombre de traversées de voies est en rapport avec le nombre de voies selon leur type. Les traversées sont plus importantes pour les routes à une chaussée puis pour les sentiers. Cependant, les traversées sont en moyenne proportionnellement moins importantes pour les routes à une chaussée. Il est possible de voir sur le graphique les différences entre les suivis. Le suivi (1) correspond au renard 2 qui vit entre le centre bâti d'une commune, des champs et des bois. Les autres suivis portent sur deux renards évoluant en milieu périurbain dense, d'où des nombres de traversées plus élevés.

Les éléments traversés par les cervidés dans les Vosges

De même que pour les renards en milieu périurbain, nous avons interpolé les traces linéaires à partir des localisations des cervidés dans les Vosges et nous avons étudié les éléments du paysage croisés par ces traces. Les résultats sont calculés pour l'ensemble des relevés par individu. Ceux-ci concernent en moyenne un peu plus de 5 jours pour les chevreuils et 4 jours pour les cerfs. Nous avons considéré que les durées des suivis sont assez similaires pour pouvoir comparer les résultats entre les individus et entre les espèces. En plus des voies de communication, nous avons pris en compte les cours d'eau, les pentes et les types de peuplements forestiers. Aucune proximité immédiate au bâti n'est observée dans les relevés, bâti qui est d'ailleurs très peu présent dans la réserve (environ 60 bâtiments pour 30 km²).
Les résultats confirment que les cerfs se situent plus souvent à proximité des voies de communication que les chevreuils. Les traversées estimées concernent environ 25 % des segments des cerfs et 10 % de ceux des chevreuils. Les voies traversées sont en majorité des chemins, puis des routes non goudronnées et les routes à 1 chaussée, les deux dernières catégories correspondant à des routes forestières sans circulation motorisée publique.
Pour les cours d'eau, la différence est nette entre les chevreuils et les cerfs suivis. Seules les traces estimées des cerfs les traversent, en moyenne 6 % des segments concernés, même si pour deux d'entre eux il s'agit surtout de cours d'eau intermittents. Un cerf en particulier vit à proximité directe de plusieurs cours d'eau permanents et les traverse régulièrement.
L'étude des valeurs de pente à proximité immédiate des traces estimées donne des résultats légèrement différents par rapport à l'étude des valeurs à l'emplacement des localisations ponctuelles. La Figure III.35 permet de comparer les deux résultats.

a. 

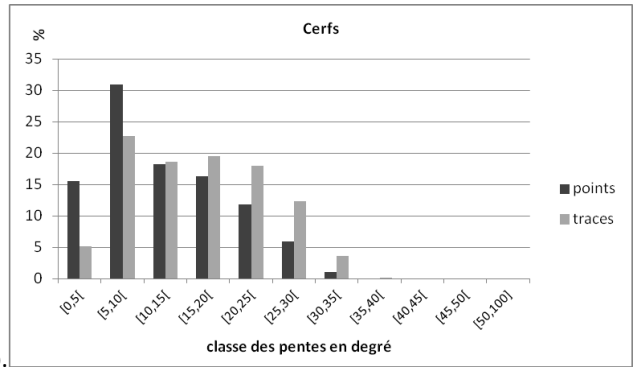
b. 

Figure III.35. Comparaison des pourcentages des pentes par intervalle de 5 degrés entre les points GPS et le long de la trace interpolée. Les résultats sont donnés pour l'ensemble des relevés des chevreuils (a) et des cerfs (b) dans les Vosges.

Pour les cerfs, la tendance reste la même avec une majorité des valeurs comprises entre 5 et 10 degrés. Pour les chevreuils, la tendance diffère car la majorité des localisations se situent entre 0 et 5 degrés mais non les traces. Les traces superposent en effet davantage de valeurs de pente entre 5 et 10 degrés, valeurs qui sont majoritaires sur le site d'étude. Cette différence nous amène à nous interroger sur la pertinence de l'interpolation linéaire pour estimer le tracé réel des déplacements. La comparaison des deux graphiques montre que les traces interpolées se situent sur des pentes fréquemment plus élevées que les points, ce qui prouve que l'approximation linéaire des traces peut être améliorée. Notre hypothèse est que les tracés réels évitent en fait les pentes élevées, au-dessus de 5 degrés, contrairement à ce qu'indiquent les traces linéaires qui sous-estiment les distances et les vitesses de déplacement. Il semble en effet vraisemblable que les chevreuils, ainsi que les cerfs, empruntent des pentes douces pour se déplacer. Des relevés GPS à une fréquence temporelle plus élevée pourraient préciser les traces réelles et confirmer ou infirmer cette hypothèse.
L'ensemble des traces se situe en zone arborée à l'exception d'un cerf qui reste pendant 6 heures dans une clairière. Les types de peuplement forestier traversé par les traces restent en pourcentages similaires à ceux correspondant aux relevés ponctuels. Une préférence pour les feuillus puis pour les peuplements mélangés est observée. Dans le III-2.2, nous poursuivrons l'analyse en augmentant la distance à la trace.

Au moyen de l'interpolation linéaire des traces, nous avons pu estimer les éléments du paysage traversés lors des déplacements. Nous avons constaté que les renards en milieu périurbain ne semblent pas bloqués par les routes à 1 chaussée et ils les traversent plusieurs fois. Cependant le nombre de traversées reste limité : entre 4 et 44 selon les individus suivis pendant 24 h (ce qui représente une moyenne de 21 par renard). Pour les cervidés en milieu forestier, les résultats intéressants concernent les pentes correspondant aux traces. Ces traces se situent sur des pentes plus élevées que les localisations ponctuelles connues, même s'il est probable que les chevreuils ainsi que les cerfs suivent les pentes faibles pour se déplacer. Cela tend à montrer que l'approximation des déplacements par les traces sous-estime les distances et que les traces sont certainement décalées par rapport aux tracés réels.

Dans la partie III-2.1, l'étude des relations géométriques entre les localisations et les éléments du paysage a mis en évidence des différences entre les individus, entre les espèces et entre le type de milieu concerné. L'estimation des chemins empruntés par des traces linéaires est intéressante car elle représente ainsi la continuité des déplacements et elle permet d'évaluer les

éléments rencontrés ou à proximité desquels se déplacent les animaux. Nous nous sommes intéressée aux trois espèces – renard, chevreuil et cerf –, dont deux sont suivies sur le même site, ce qui permet de diminuer les sources de différences entre les comportements. Nous voyons que l'interprétation des résultats doit s'effectuer dans le contexte des sites d'étude, en plus de celui des comportements communs des espèces, car le paysage varie. En cohérence avec la composition des sites, les renards en milieu périurbain traversent davantage de voies de communication que les cervidés en milieu forestier et ils se tiennent plus proches des bâtiments. Les zones arborées semblent être utilisées de manière préférentielle par les renards comme lieu de refuge et comme lieu de déplacement. Les cervidés sont tous localisés en forêt, ce qui ne permet pas de montrer une préférence particulière pour le couvert boisé. La distinction des peuplements forestiers indique que les cerfs et surtout les chevreuils se situent principalement dans les feuillus. Ces résultats descriptifs des localisations sont à présent mis en parallèle avec la description des sites d'étude afin de préciser les préférences spatiales.

2.2. Recherche de comportements de sélection spatiale lors des déplacements : la sélection du type d'habitat

Nous avons décrit la situation des animaux dans les thèmes d'occupation du sol pour un territoire donné. Nous avons pour cela analysé les relations spatiales entre les points relevés puis interpolés en traces, et les éléments du paysage saisis à grande échelle dans la BD TOPO® et le RGE®ALTI. Cette description nous a permis d'identifier les éléments pouvant jouer un rôle dans la présence des animaux à certains moments. Nous souhaitons à présent qualifier les éléments du paysage composant les habitats des individus (partie III-2.2), puis utilisés dans le cadre de déplacements à un niveau fin (dans la partie suivante III-2.3). La caractérisation de la composition des habitats permet de préciser les causes paysagères de la présence des animaux, en relation avec les activités des animaux et représentant ainsi des motivations aux déplacements.

Nous cherchons à caractériser la sélection du type d'habitat à partir de l'étude des espaces parcourus, que nous appelons aussi espaces de vie et qui peuvent être qualifiés de domaines vitaux si les localisations sont récoltées sur plusieurs jours. La caractérisation de l'espace parcouru permet de qualifier la disponibilité en occupations du sol, puis de la mettre en perspective des voisinages stricts. Nous reprenons l'estimation par l'enveloppe convexe des localisations présentée dans la partie III-1.2 dont nous analysons la composition paysagère. Les compositions des espaces parcourus sont comparées entre elles. Puis celles-ci sont comparées avec les compositions respectives sur des emprises plus larges autour des espaces de vie. Nous avons choisi de prendre comme emprise plus large ce que nous appelons site ou zone d'étude : il s'agit du rectangle englobant autour des localisations avec un contour éloigné d'au moins 1 km de toutes les localisations. Cela nous permet de considérer l'emplacement des animaux dans leur contexte spatial général. Nous avons utilisé deux sources de données de description de l'espace : la base CORINE Land Cover et le RGE®. Nous utilisons également le détail des essences forestières par la base Carte Forestière V2 pour caractériser les localisations des cervidés dans les Vosges. Nous présentons les résultats d'analyse par espèces, dont nous avons vu que les superficies moyennes d'espace de vie varient.

2.2.1. L'habitat sélectionné par les renards en milieu périurbain

- Comparaison entre les espaces parcourus par les renards et les sites d'étude

Nous étudions la sélection de l'habitat à partir de la composition des espaces de vie selon l'occupation du sol décrite dans les bases de données à moyenne et à grande échelles. Les types d'occupation du sol sont cartographiés par la base de données CORINE Land Cover à l'échelle du 100 000ème. Nous résumons dans le Tableau III.8 en page suivante la composition des espaces de vie par les pourcentages des superficies des classes d'occupation du sol. Par cas d'étude, la première colonne indique la composition de la zone d'étude. La seconde colonne correspond à la composition des espaces de vie en pourcentage moyen par individu. La typologie CORINE Land Cover contient 15 catégories sur la zone d'étude d'Annemasse et de Pontarlier et 16 catégories sur la zone d'étude autour de Nancy. La superficie des rectangles englobant est égale pour Annemasse à 80 km², pour Pontarlier à 65 km² et pour Nancy 45 km². Pour les deux cas d'étude des renards près d'Annemasse et de Pontarlier, les durées totales des suivis individuels et le nombre de jours concernés permettent de considérer que les localisations couvrent les domaines de vie individuels. Pour le cas d'étude de Nancy, les suivis concernent une ou deux journées, ce qui ne couvre certainement pas l'ensemble de l'espace occupé mais au moins une partie représentative des espaces parcourus pendant 24 heures. Les occupations du sol qui correspondent à une présence importante des renards sont mises en évidence dans le tableau. Les écarts entre les proportions des occupations du sol dans les espaces de vie – ou parcourus – des renards et les proportions des occupations du sol dans les zones d'étude, peuvent être grands. Par exemple, pour le cas d'étude de Pontarlier, nous remarquons qu'en moyenne les prairies occupent 44 % des espaces parcourus alors que cette occupation du sol ne couvre que 17 % des zones d'étude, ce qui peut montrer une sélection au niveau de l'habitat.

L'étude de la composition en occupations du sol des espaces parcourus tend à confirmer l'adaptation des renards à plusieurs types de milieux, ce qui était attendu pour une espèce dite généraliste. En milieu périurbain à Annemasse et à Nancy, les individus occupent en majorité le tissu urbain discontinu. Viennent ensuite les occupations du sol en terres arables et en forêt de feuillus sur la zone d'Annemasse. Dans le cas de Nancy, où les individus vivent dans le milieu le plus densément urbanisé parmi les trois cas d'étude des renards, les espaces occupés contiennent, comparativement à la zone d'étude, de forts pourcentages de zones industrielles et commerciales et d'espaces verts urbains. Les renards parcourent également beaucoup les terres arables et vergers, les prairies, les forêts, les zones d'équipements sportifs et de loisirs. La ville de Pontarlier a une zone urbaine moins étalée par rapport aux deux précédentes zones. Les prairies et les terres arables entourant la ville sont les deux types d'occupation du sol les plus parcourus, dans des proportions supérieures à celles de la zone d'étude. Le tissu urbain discontinu et les forêts (de conifères sur la zone) sont aussi habités. Nous pouvons remarquer par ailleurs que les classes d'occupation du sol fortement représentées dans les zones d'étude (au-delà de 10 % de superficie) sont toutes parcourues par les individus (au-delà de 5 %). L'échelle de la base CORINE Land Cover a permis de visualiser les caractéristiques principales des zones d'habitat.

Tableau III.8. Caractérisation de la sélection des lieux parcourus par les renards : les pourcentages de types d'occupation du sol à partir de la base CORINE Land Cover pour les zones d'étude et pour les espaces de vie estimés. Approximation à l'entier le plus proche (les valeurs nulles sont donc en fait des valeurs très faibles).

		Renards					
		Annemasse		Pontarlier		Nancy	
Thème d'occupation du sol	Classe d'occupation du sol CORINE Land Cover	% sur la zone d'étude	% moyen par individu (n = 8)	% sur la zone d'étude	% moyen par individu (n = 4)	% sur la zone d'étude	% moyen par individu (n = 4)
Zones urbanisées	Tissu urbain continu	1	0			3	
	Tissu urbain discontinu	37	38	15	11	36	39
	Zones industrielles et commerciales	4	4	5	0	9	22
Transport	Réseaux routier et ferroviaire et espaces associés	1	1			0	1
	Aéroports			2		2	
	Zone d'extraction de matériaux	0	1	0			
	Décharges					2	
Espaces verts et agricoles aménagés	Espaces verts urbains	0				2	8
	Équipements sportifs et de loisirs	1	1	2	7	3	5
	Terres arables hors périmètre d'irrigation	30	23	13	20	13	8
	Vergers et petits fruits					1	
	Prairies	2	2	17	44	15	7
	Systèmes culturaux et parcellaires complexes	4	8	6		1	
	Surfaces essentiellement agricoles, interrompues par des espaces naturels importants	3	4	3	0	2	0
Espaces verts naturels	Forêts de feuillus	13	16			9	8
	Forêts de conifères			20	10		
	Forêts mélangées	3	3	4	2		
	Pelouses et pâturages naturels			3	6		
	Forêt et végétation arbustive en mutation			4		0	
Zones humides	Marais intérieurs	0	0	6			
	Plans d'eau	1		1		1	

Valeurs pour les zones d'étude et pour les espaces de vie :

non présent

valeur de plus de 5 % et écart de moins de 5 % entre zone d'étude et espace de vie

valeur de plus de 5 % et écart de plus de 5 % entre zone d'étude et espace de vie

- Description de la composition à grande échelle des espaces parcourus

Nous précisons à présent la composition des espaces à l'aide de la description à grande échelle du RGE®. La différence de précision spatiale et de définition des classes d'occupation du sol est illustrée par les deux cartes de la Figure III.36 sur une même partie du site d'étude d'Annemasse. L'emprise de la carte correspond au domaine vital estimé pour un renard. La base CORINE Land Cover en Figure III.36.a contient des proportions en occupations du sol un peu différentes de celles du site d'étude pour l'ensemble des renards. Le renard a en effet la répartition suivante sur son domaine vital : 43 % de terres arables, 17 % de prairies, 17 % de forêt, 15 % tissu urbain discontinu, 8 % de surfaces essentiellement agricoles. L'association et la proximité de ces occupations du sol peuvent expliquer la présence de renard : une forêt à proximité de prairies et de cultures, en périphérie d'une zone résidentielle. Ces occupations du sol présentent a priori toutes un intérêt pour cette espèce. Les localisations GPS du renard sont cartographiées en Figure III.36.b avec le détail des éléments topographiques. Les cartes pour les autres renards suivis sont présentées en Annexe 1.

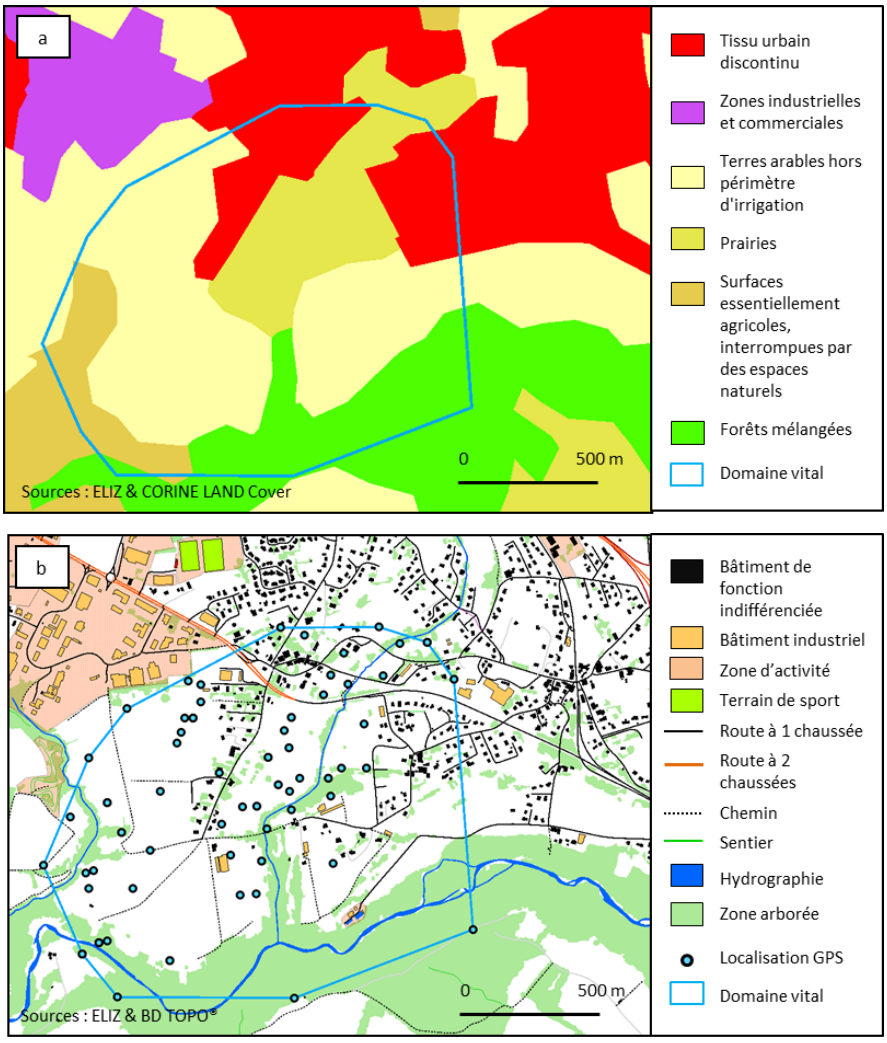


Figure III.36. Cartographie sur une partie de la zone d'étude dans l'agglomération d'Annemasse où vit un des huit renards suivis : a) les occupations du sol de CORINE Land Cover, b) les éléments topographiques de la BD TOPO®. Les échelles de représentations adaptées varient, 100 000ème et 5000ème, ce qui permet une visualisation du territoire différente.

La description de l'espace par la BD TOPO® permet de déterminer le nombre, l'emplacement et les emprises spatiales des éléments du paysage. Les bâtiments sont distincts et leur fonction est précisée, par exemple les bâtiments administratifs et les bâtiments industriels. Les tracés des routes sont saisis ainsi que ceux des cours d'eau. Les zones de végétation arborée au-delà de 5 ha sont différenciées. Nous présentons dans le Tableau III.9 en page suivante les éléments contenus dans la BD TOPO® qui sont particulièrement présents dans les espaces parcourus par les renards. L'objectif est de compléter la description de l'espace de vie à partir des informations géographiques à grande échelle. Les thèmes de données du bâti, des routes, de l'hydrographie et de la végétation arborée sont très présents dans des trois sites d'étude : nous en donnons une caractérisation qualitative. Nous indiquons également les thèmes moins représentés sur les sites d'étude, comme les zones d'activités et les éléments hydrographiques. Nous souhaitons identifier si des éléments remarquables, par leur fonction ou par leur répartition, peuvent jouer un rôle dans la présence et les choix de déplacements des renards. Par exemple sur la carte de la Figure III.36.b, nous observons que la répartition du bâti n'est pas continue et est moyennement dense. Les routes sont majoritairement à une chaussée et il y a de nombreux chemins dans la partie sud. L'hydrographie est caractérisée par une rivière importante avec deux affluents, bordés par de la végétation arborée et avec peu de bâtiments et d'accès routiers à proximité. Une zone industrielle comprend des bâtiments industriels ou commerciaux au nord-ouest de l'espace parcouru par le renard. Quelques autres éléments remarquables sont présents : terrains de sport, pylônes et lignes électriques (non représentés sur la carte).

D'autres données, non détaillées dans le Tableau III.9, sont observées dans les espaces de vie, comme les constructions ponctuelles, linéaires et surfaciques, les lignes électriques, les réservoirs d'eau. Elles sont utiles pour affiner la description de l'espace lors des interprétations des déplacements (partie III-2.3). Pour les éléments décrits dans le tableau, nous remarquons que les espaces parcourus ont des compositions différentes. Ces derniers correspondent à des zones relativement urbanisées autour de Nancy avec des distributions du bâti et du réseau routier plus denses. Le cas d'étude de Pontarlier concerne les espaces parcourus les moins urbains par l'ensemble des renards étudiés. Ces espaces contiennent le moins d'objets dans la BD TOPO®, notamment dû au fait qu'une surface importante concerne des prairies et des cultures. L'agglomération d'Annemasse correspond à de nombreuses surfaces d'activités industrielles et commerciales ainsi qu'à des cultures sous serres et à un aérodrome. Nous notons l'importance du contexte des sites d'étude dans les interprétations des déplacements ainsi que celle du rôle des comportements individuels. Des tendances générales peuvent toutefois être constatées par site d'étude. En parallèle, des remarques propres à certains individus parcourant une zone particulière peuvent être formulées. Des différences importantes entre les espaces parcourus par les individus peuvent en effet être identifiées. Cette différence est remarquée en particulier entre un individu sur une zone peu urbanisée et les trois autres en milieu urbain dans la zone de Nancy.

Tableau III.9. Récapitulatif des éléments présents dans les espaces parcourus (acronyme DV car assimilés aux domaines vitaux des individus) par les renards estimés par enveloppe convexe et décrits dans la BD TOPO®.

Thème géographique	Site d'étude	Caractéristiques
végétation arborée	Annemasse	moyenne de 25 % de la surface couverte [entre 12 % et 45 % selon les individus]
	Pontarlier	moyenne de 15 % de la surface couverte [entre 1 % et 40 %] : davantage de prairies et cultures
	Nancy	moyenne de 30 % de la surface couverte [entre 23 % et 40 %]
hydrographie	Annemasse	pas de points d'eau, cours d'eau présents dans le DV (domaine vital) de 6 individus, surfaces d'eau pour 4 individus
	Pontarlier	pas de points d'eau, cours d'eau et surfaces d'eau présents dans tous les DV
	Nancy	peu de points d'eau, 7 cours d'eau présents dans 1 DV, surfaces d'eau permanentes ou temporaires présents dans 3 DV
réseau des voies	Annemasse	moyenne de 120 routes au km² [entre 30 et 90]. Majorité de routes à 1 chaussée puis de chemins (attribut sur la nature), majorité de voies à faible trafic (attribut sur l'importance)
	Pontarlier	moyenne de 60 routes au km² [entre 50 et 240]. Majorité de routes à 1 chaussée puis de routes non goudronnées, présence de nombreux chemins et sentiers, présence de routes à 2 chaussées (attribut sur la nature), majorité de voies à faible trafic, beaucoup à trafic important et moyen (attribut sur l'importance)
	Nancy	moyenne de 170 routes au km² [entre 20 et 280]. Majorité de routes à 1 chaussée puis sentiers et de routes à 2 chaussées (attribut sur la nature), majorité de voies à faible et à moyen trafic (attribut sur l'importance)
voies ferrées	Annemasse	présence de voies ferrées dans la moitié des DV
	Pontarlier	présence de voies ferrées dans la moitié des DV
	Nancy	présence de voies ferrées dans la moitié des DV
bâti indifférencié (habitations)	Annemasse	moyenne de 250 bâtiments au km² [entre 100 et 480]
	Pontarlier	moyenne de 110 bâtiments au km² [entre 10 et 170] : zone périurbaine peu densément peuplée
	Nancy	moyenne de 210 bâtiments au km² [entre 30 et 310] : 1 DV est surtout très peu couvert par le bâti
bâtiments industriels et remarquables	Annemasse	[selon les DV entre 1 et 85] : en majorité des bâtiments industriels sinon des commerces. Les bâtiments remarquables concernent un établissement sportif.
	Pontarlier	[selon les DV entre 1 et 20] : en majorité des bâtiments industriels, des serres puis des commerces. Les bâtiments remarquables sont en faible nombre, par exemple : mairies, édifices religieux, sportifs.
	Nancy	[selon les DV entre 0 et 5] : en majorité bâtiments industriels et commerciaux, quelques serres
zones d'activités	Annemasse	[entre 1 et 25 % des DV] : zones industrielles, un aérodrome
	Pontarlier	[entre 0 et 7 % des DV] : en majorité zones industrielles dont une zone de carrière, commerciales et pour l'enseignement
	Nancy	[entre 0 et 40 % des DV] : en majorité zones de culture et de loisirs (parcs), puis zones industrielles, commerciales et pour l'enseignement
cimetière, terrain sport	Annemasse	présence d'un cimetière dans la moitié des DV, entre 1 et 3 terrains de sport dans 6 DV
	Pontarlier	aucun cimetière, 1 terrain de sport pour 1 individu
	Nancy	un grand cimetière dans 1 DV, quelques terrains de sport dans 3 DV

Les particularités de chaque espace parcouru doivent être conservées afin de mieux expliquer les caractéristiques du paysage autour des localisations des individus. Nous illustrons en Figure III.37 des occupations du sol particulières parcourues uniquement par deux individus dans le site de Nancy : un centre équestre, qui est inclus dans les surfaces d'activités des bases de données, une aire de triage ferroviaire, une zone d'activité commerciale avec de grands parkings, un espace vert urbain. Ces occupations du sol moins denses en termes de constructions bâties sont effectivement présentes dans la plupart des espaces parcourus par les renards.

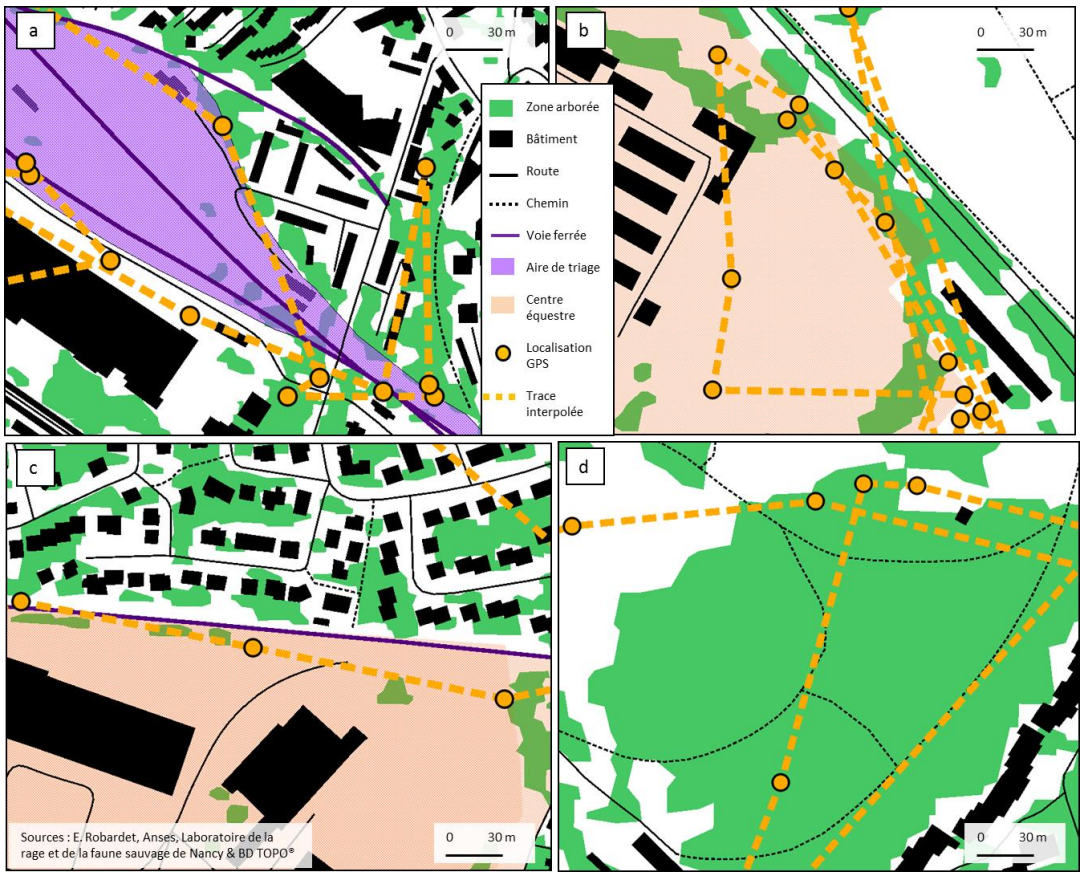


Figure III.37. Cartographie des occupations du sol parcourues par les renards dans l'agglomération de Nancy : a) une aire de triage ferroviaire, b) un centre équestre, c) le long d'une voie ferrée en bordure d'une zone commerciale contenant de nombreux parkings, d) un parc urbain inséré entre des zones résidentielles et un campus universitaire.

L'analyse descriptive du relief dans les trois cas d'étude des renards ne permet pas de mettre en évidence une préférence ou un évitement prononcé de cette espèce pour certaines valeurs de pentes et l'altitude. Les valeurs sont données en Annexe 8 sur la zone d'étude, les espaces parcourus et pour les localisations par individu. Nous étudierons en III-2.5 si les renards se situent dans un relief significativement différent de celui des zones d'étude. Nous remarquons dès à présent juste une corrélation positive entre les localisations des renards et leur espace parcouru, concernant l'altitude et la pente. Le coefficient de corrélation de Bravais-Pearson entre les moyennes des altitudes des localisations par individu et celles dans les espaces parcourus est égal à 0,99 avec une significativité à 0,1 %. Pour les pentes, le coefficient est égal à 0,95 avec de même une significativité à 0,1 %. Ceci signifierait qu'il n'a pas un évitement marqué pour une forme de relief particulier lors des déplacements.
L'identification des éléments présents dans les espaces parcourus nous permet ensuite de cibler les données à analyser pour caractériser le rôle des éléments du paysage. Par exemple, il peut

être intéressant d'étudier les localisations des animaux par rapport aux surfaces d'activités, seulement si celles-ci sont présentes dans l'espace parcouru. Les informations récoltées par thème géographique seront analysées quantitativement en III-2.3 dans l'analyse de l'espace autour des localisations et des traces. Elles permettront si possible, de préciser l'influence des éléments du paysage sur les déplacements.

D'un point de vue général sur les trois sites d'étude, les renards occupent des zones en périphérie des centres urbains denses. Les espaces parcourus ont une surface de végétation importante (entre 15 et 30 % pour les zones arborées) et sont aussi occupés par des habitations et des bâtiments industriels qui n'empêchent pas la présence des renards. Ces espaces contiennent souvent une ou plusieurs zones moins urbanisées : espaces verts, zones commerciales, surfaces agricoles, aérodromes, selon les renards et leurs domaines vitaux. Ces derniers éléments sont parcourus lorsqu'ils se situent dans le domaine vital des renards. Ils servent en fait soit de gîtes de repos soit de lieux de recherche de ressources associés à des déplacements longs. Ils subissent généralement moins de dérangements humains notamment la nuit. Le taux élevé d'urbanisation des sites d'étude a pour conséquence le nombre important de routes, majoritairement à une chaussée, signifiant des aménagements des bas-côtés et un trafic généralement moindre que pour des routes à deux chaussées séparées.

2.2.2. Les caractéristiques de l'habitat des cervidés en milieu forestier

Dans cette partie, nous nous attachons d'abord à comparer la description du milieu forestier dans le site d'étude dans les Vosges à partir des informations de la base CORINE Land Cover de 2006, de la BD TOPO® et de la Carte Forestière V1 et V2. L'échelle spatiale des différentes bases de données et la précision attributaire influence potentiellement la description de la végétation du site d'étude et par conséquent la description des domaines vitaux des animaux. Nous caractérisons ensuite les éléments contenus dans les espaces parcourus par les chevreuils et les cerfs par rapport au site d'étude. Nous nous concentrons en particulier sur la composition en peuplements forestiers.

- La composition du site d'étude des Vosges d'après différentes sources de données

Le Tableau III.10 met en comparaison la composition du site d'étude des Vosges d'après les quatre bases citées en introduction. Les échanges avec les écologues nous ont orientée vers une prise en compte des peuplements forestiers la plus précise possible. La description contenue dans la Carte Forestière V2 est plus adaptée pour les cervidés que la distinction entre feuillus et conifères dans la BD TOPO®. Les chevreuils et les cerfs sont en effet sélectifs par rapport aux essences qui constituent leurs ressources alimentaires. La pertinence de la démarche de comparaison est d'autant plus forte pour la précision attributaire car en milieu forestier, l'ensemble du couvert arboré est concerné par les quatre bases de données citées. Ceci n'était pas le cas sur les sites périurbains des renards qui contenaient une majorité de petites surfaces arborées présentes uniquement dans la BD TOPO®.

Tableau III.10. La composition en peuplements forestiers du site d'étude des Vosges. Quatre sources d'informations sont exploitées : CORINE Land Cover de 2006, de la BD TOPO® et de la Carte Forestière V1 et V2. Nous présentons la composition en fonction de quatre grands types de végétation : conifères, feuillus, forêts mélangées, forêts ouvertes ou autres formations végétales.

Nom de la base de données	Pourcentage de surface du site d'étude couvert par la forêt	Nombre d'objets de la couche de végétation compris dans le site d'étude	Nombre de valeurs attributaires concernant la végétation arborée
CORINE Land Cover 2006	97,4	17	4
BD TOPO®	96,4	103	6
Carte Forestière V1	95,4	119	13
Carte Forestière V2	96,4	161	15

CORINE Land Cover 2006		BD TOPO®		Carte Forestière V1		Carte Forestière V2	
Valeur d'attribut	Pourcentage de surface selon les principaux attributs	Valeur d'attribut	Pourcentage de surface selon les principaux attributs	Valeur d'attribut	Pourcentage de surface selon les principaux attributs	Valeur d'attribut	Pourcentage de surface selon les principaux attributs
Forêts de feuillus	9,3	Forêt fermée de feuillus	53,3	Autre futaie de hêtre	38,8	Hêtre pur	26,4
				Autre futaie de feuillus indifférenciés	1,6	Mélange de feuillus	6,2
				Autre futaie de chêne	1,4	Chênes décidus purs	5,2
Forêts de conifères	21,5	Forêt fermée de conifères	21	Autre futaie de conifères indifférenciés	20,8	Mélange de conifères prépondérants et feuillus	14,3
				Autre futaie de pins	3,2	Sapin ou ,Épicéa	8
				Autre futaie d'épicéa	2	Mélange de conifères	7,4
				Autre futaie de sapin	1,3	Pin sylvestre pur	2,5
Forêts mélangées	59,3	Forêt fermée mixte	21,9	Autre futaie mixte	22,4	Mélange de feuillus prépondérants et conifères	7,6
Forêt et végétation arbustive en mutation	7,4	Autres essences (Bois, Haies)	0,1	Peuplement de fond de vallée à essences ripicoles	1,7	Jeune peuplement ou coupe rase ou incident	15,4
Autres : Prairies	*0,9*			Autres essences	1,8	Autres essences	3,4

conifères | peuplements mélangés | feuillus | autres formations végétales

La couverture de la forêt diffère peu en pourcentages de surfaces d'après les quatre sources de données (2 %). Le nombre d'objets saisis sur la zone est fonction du nombre de valeurs attributaires : plus celui-ci est élevé, plus le nombre d'objets est élevé. La source de données la plus riche en valeurs attributaires, au nombre de 15, est la Carte Forestière V2. En détaillant la répartition en surfaces selon les valeurs attributaires, nous remarquons des incohérences entre les sources. La base de données CORINE Land Cover marque un pourcentage majoritaire pour la classe des forêts mélangées alors que d'après les autres bases, il y a de plus forts pourcentages des peuplements de feuillus, puis de peuplements mélangés et de conifères. Nous remarquons par contre bien la cohérence entre la BD TOPO® et la Carte Forestière V2 qui ont en commun une partie de leur processus de production. Nous pouvons visualiser la différence de couverture spatiale des quatre bases en Figure III.38.

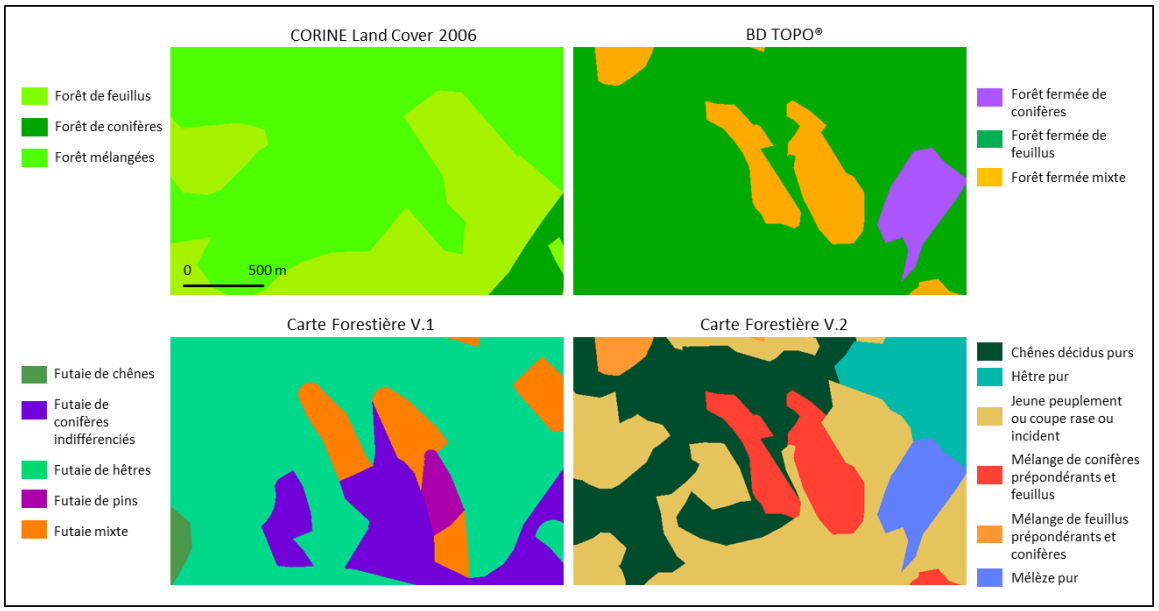


Figure III.38. Cartographie des types d'essences forestières sur une partie de la RNCFS de La Petite Pierre, d'après quatre sources : CORINE Land Cover, BD TOPO®, Carte Forestière V1 et Carte Forestière V2.

La base CORINE Land Cover nous semble très généralisée par rapport aux autres bases. En effet, l'échelle spatiale moyenne de CORINE Land Cover est le 100 000ème, entraînant le regroupement de certaines essences lorsque celles-ci couvrent de petites surfaces. La Carte Forestière V1 est issue d'un autre procédé de relevés forestiers et date d'au moins 10 ans, ce qui implique que les informations sur la répartition des essences sont moins récentes.

- Caractérisation de préférences spatiales dans la sélection des espaces parcourus

Nous analysons à présent la composition des espaces parcourus à partir des thèmes de CORINE Land Cover et de la BD TOPO®, et pour la couche de végétation également à partir des deux versions de la Carte Forestière. Les résultats d'analyse sont regroupés pour les cerfs et pour les chevreuils dans le Tableau III.11 car les deux espèces évoluent dans des espaces proches compris dans la RNCFS.

Tableau III.11. Les pourcentages moyens par individu des essences forestières contenues dans les espaces parcourus par les chevreuils et les cerfs dans les Vosges.

Base de données	Valeur d'attribut	Chevreuils	Cerfs
CORINE Land Cover	Forêts de feuillus	0	3,9
	Forêts de conifères	0	13,6
	Forêts mélangées	89,2	61,7
	Forêt et végétation arbustive en mutation	10,8	20,9
	Autres : Prairies	0	0
BD TOPO®	Forêt fermée de feuillus	68,5	69,6
	Forêt fermée de conifères	7	11,7
	Forêt fermée mixte	24,2	18,3
	Forêt ouverte	0	0
	Autres essences (Bois, Haies)	0	0
Carte Forestière V1	Autre futaie de hêtres	62,7	54,4
	Autre futaie de feuillus indifférenciés	0,2	0,9
	Autre futaie de chênes	0	1
	Autre futaie de conifères indifférenciés	13,6	22,9
	Autre futaie de pins	2,1	2,7
	Autre futaie d'épicéas	0,1	1
	Autre futaie de sapins	0,4	0,4
	Autre futaie mixte	20,8	16
	Peuplement de fond de vallée à essences ripicoles	0	0
	Autres essences	0	0,7
Carte Forestière V2	Hêtre pur	17,5	20,5
	Mélange de feuillus	7,7	2,6
	Chênes décidus purs	19,9	14,2
	Mélange de conifères prépondérants et feuillus	14,7	10,9
	Sapin ou Épicéa	2	1,8
	Mélange de conifères	4	2
	Pin sylvestre pur	0,9	0,3
	Mélange de feuillus prépondérants et conifères	9,4	7,4
	Jeune peuplement ou coupe rase ou incident	22	31,8
	Autres essences	1,6	8

- Les chevreuils dans les différents peuplements forestiers

À partir de la base CORINE Land Cover, nous constatons que les chevreuils parcourent deux classes, en grande majorité celle des forêts mélangées (89 %), et celle de la « forêt et végétation arbustive en mutation » (11 %). Les résultats à partir de la BD TOPO® sont plus nuancés et les animaux sont principalement localisés dans la forêt fermée de feuillus (68 %), moins dans la forêt mixte (24 %) et très peu dans la forêt fermée de conifères (7 %). Les deux bases de la Carte Forestière précisent les essences. Dans la version 1, la futaie de hêtres couvre en majorité les espaces parcourus par les chevreuils (63 %), suivie par la futaie mixte (21 %). Dans la version 2, la classe « jeune peuplement ou coupe rase ou incident » est majoritaire (22 % des localisations), puis celle des chênes décidus purs (20 %) et celle des hêtres purs (17 %). Les mélanges de conifères et feuillus viennent ensuite (15 %). Les localisations et les espaces parcourus des chevreuils sont cartographiés avec la Carte Forestière V2 en Figure III.39.

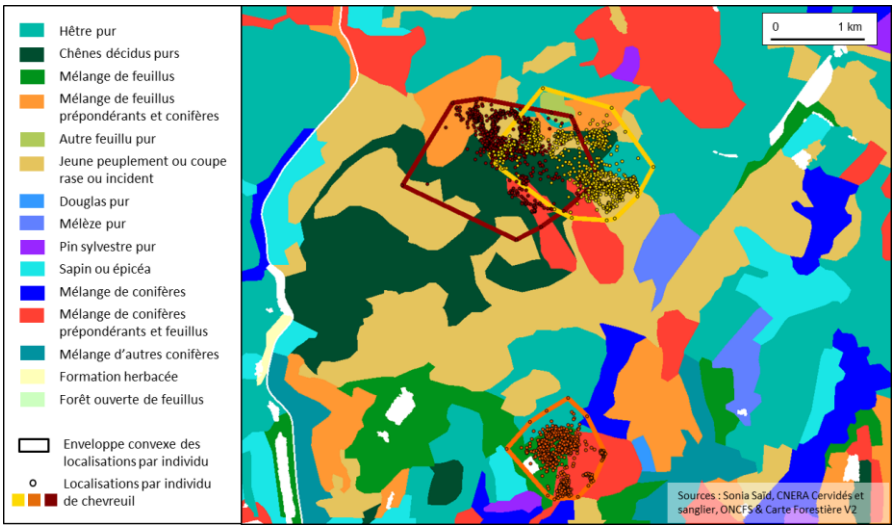


Figure III.39. Situation des trois chevreuils suivis en moyenne pendant 5 jours. Les espaces parcourus contiennent majoritairement des peuplements « jeune peuplement ou coupe rase ou incident » et « chênes décidus purs ».

- Les cerfs dans les différents peuplements forestiers

La composition des espaces parcourus par les cerfs est similaire à ceux parcourus par les chevreuils avec quelques différences. Ces différences portent, et ceci à partir de trois bases de données sur les quatre étudiées, sur une présence plus importante des cerfs dans les essences de conifères. 14 % en moyenne des espaces parcourus par les cerfs sont situés dans les forêts de conifères d'après CORINE Land Cover, 12 % d'après la BD TOPO®. Pour la Carte Forestière v1, 27 % des espaces sont couverts par de conifères (contre 16 % pour les chevreuils). La Carte Forestière V2 montre peu de différence entre les cerfs et les chevreuils dans la composition de conifères mais une différence dans l'ordre des compositions de feuillus parcourus : davantage de futaies de hêtres purs (14 %) que de futaie de chênes décidus (21 %) sont parcourues par les cerfs. Les cerfs parcourent également plus que les chevreuils la classe « jeune peuplement ou coupe rase ou incident ». Les localisations des cerfs sont cartographiées superposées à la Carte Forestière V2 en Figure III.40.

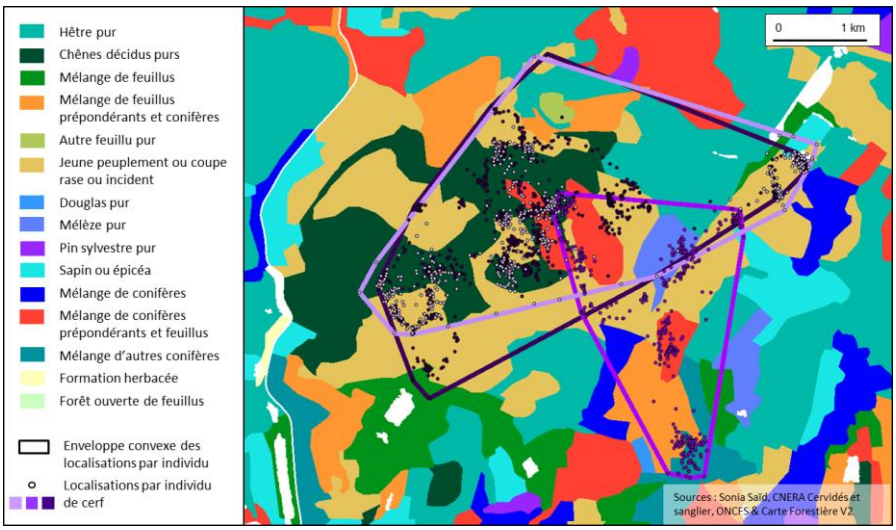


Figure III.40. Situation des trois cerfs suivis en moyenne pendant 4 jours. Les espaces parcourus contiennent majoritairement des peuplements « jeune peuplement ou coupe rase ou incident » et « hêtres purs ».

- Comparaison en peuplements forestiers entre les espaces parcourus par les chevreuils, par les cerfs et le site d'étude

Par comparaison avec le site d'étude, la composition des espaces parcourus possède une proportion plus grande de peuplements de feuillus chez les chevreuils et les cerfs. Ceci est observé à partir de CORINE Land Cover et de la BD TOPO®. À partir de la BD TOPO®, les rapports entre le pourcentage de composition en feuillus des espaces parcourus divisé par le pourcentage du site d'étude sont de 1,29 et 1,31 respectivement pour les chevreuils et les cerfs. Les rapports respectifs sont 0,33 et 0,56 concernant les conifères, dénotant un certain évitement par les animaux pour ces peuplements. Selon la Carte Forestière V2, la différence de proportion est importante pour les chênes décidus : les rapports des proportions entre les domaines vitaux et le site d'étude sont de 3,8 pour les chevreuils et de 2,7 pour les cerfs. De même pour les jeunes peuplements ou les coupes rases, les rapports sont de 1,4 pour les chevreuils et de 2,1 pour les cerfs. Pour la Carte Forestière V1, nous notons un parcours dans les peuplements de hêtres. Le rapport moyen pour les chevreuils et pour les cerfs est de 1,5 ce qui pourrait montrer une sélection de cette essence. Cependant, cette hypothèse va en contradiction avec les autres sources de données notamment la Carte Forestière V2 qui est plus récente, nous ne la retenons donc pas.

- La composition des espaces parcourus pour les autres éléments du paysage

Concernant les autres éléments du paysage que la végétation, les domaines de vie des cerfs comprennent quelques cours d'eau. Ceux-ci correspondent à une rivière principale et à de petits affluents (tous de longueur environ égale à 1 km, avec un niveau d'eau permanent). Contrairement aux chevreuils, les cerfs se déplacent dans des zones de talwegs où s'écoulent des cours d'eau plus ou moins importants. Le nombre de bâtiments est compris entre 0 et 4 dans les espaces parcourus, ce qui ne permet pas de conclure à un évitement particulier. Nous étudierons les voies de communication en III-2.3 puis en III-2.5 dans la caractérisation des lieux de déplacements. Ces voies nous semblaient en effet moins pertinentes à étudier dans la sélection de l'habitat que la végétation. Pour le relief, nous l'avons déjà caractérisé par comparaison entre la zone d'étude et les localisations des animaux. La sélection des pentes s'effectue probablement davantage à un niveau local, lors des déplacements, que dans le choix d'un domaine vital.

En résumé, dans la RNCFS, nous relevons une certaine similitude dans la composition des espaces parcourus par les chevreuils et les cerfs. Les deux espèces semblent montrer une sélection de leur habitat préférentiellement dans les forêts de feuillus majoritaires notamment pour les chênaies et pour les jeunes peuplements et coupes rases. Quelques nuances peuvent toutefois être apportées. Les sources de données indiquent que les chevreuils sont relativement absents des conifères. Les cerfs y sont davantage présents, de même qu'ils parcourent davantage les jeunes peuplements ou coupes rases. Cela peut être lié au fait que les cerfs parcourent un espace plus étendu et sont donc susceptibles de rencontrer une diversité d'essences plus grande que les chevreuils. Cela peut aussi correspondre à une moindre sélection des types d'essences forestières mais à une sélection plus grande envers des zones de végétation ouverte qui correspondent à leur régime alimentaire. Pour étudier la sélection de l'habitat par les cervidés, nous avons conservé les quatre bases de données. Cependant nous n'utiliserons que la BD TOPO® et la Carte Forestière V2 qui sont plus précises et plus à jour pour caractériser des préférences spatiales locales lors des déplacements dans la partie III-2.3.

2.2.3. Les chevreuils en zone agricole et forestier fragmenté

Nous avons extrait la composition du site d'étude des chevreuils dans le canton d'Aurignac, selon la même démarche que pour les autres cas d'étude. Nous n'avons pas effectué d'analyses descriptives afin de déduire des sélections de types d'habitat par les chevreuils au vu du nombre de relevés. Nous décrivons toutefois les éléments du paysage qui nous semblent importants afin de caractériser cet habitat.
Les durées des relevés de localisations par individu sont comprises entre deux mois et deux ans. Les déplacements en dehors du cœur du domaine de vie ne sont donc pas pris en compte dans la zone d'étude analysée. Celle-ci a une superficie d'un peu moins de 200 km². En comparaison avec l'habitat du chevreuil en milieu forestier dans les Vosges, la diversité des types d'occupation du sol est plus grande. Sur le site d'étude, 8 classes CORINE Land Cover sont présentes. 80 % de la surface est couverte par des cultures et des prairies (classes « terres arables hors périmètre d'irrigation », « systèmes culturaux et parcellaires complexes » et « prairies »). Le reste est composé de forêts de feuillus ou de conifères et de zones arborées fragmentées. Le tissu urbanisé, qui inclut deux communes, et les deux grands plans d'eau présents occupent moins de 1 % de la surface. En considérant la BD TOPO®, le site d'étude contient beaucoup d'objets étant donné son étendue spatiale. À titre d'exemple, le nombre de bâtiments sur la zone est d'environ 2500, ce qui correspond à une densité de moins de 15 constructions au km². Il y a plus de 3000 tronçons de routes sur le site : 60 % de routes à une chaussée, 25 % de chemins et de sentiers, 15 % de routes non goudronnées. La couche de végétation arborée possède environ 10 500 objets sur la zone correspondant à 9400 zones de végétation (par comparaison, il y en a environ 100 sur le site des Vosges). Le nombre d'individus suivis est grand et les compositions des espaces parcourus varient entre un milieu forestier continu et un milieu agricole avec des zones arborées fragmentées. Nous notons cependant la complémentarité des sources de données sur cette zone en particulier. La BD TOPO® ne couvre pas les espaces agricoles mais détaille les zones arborées, les infrastructures de transport et les bâtiments, alors que la base CORINE Land Cover décrit les surfaces exploitées en cultures et les prairies (intéressantes également pour les cas d'étude sur les renards), et que la Carte Forestière précise les grands types d'essences. Sur le département concerné, seule la Carte Forestière V1 est pour l'instant disponible. La visualisation de ces différences est illustrée par la superposition de ces sources en Figure III.41. Les déplacements d'un chevreuil pendant 10 jours peuvent être analysés en s'appuyant sur ces différentes sources de données. Les localisations peuvent être caractérisées en fonction de leur situation par rapport aux éléments du paysage. Nous notons ici une concentration des localisations dans les prairies bordant la rivière (selon CORINE Land Cover) et à proximité de petites zones arborées (selon la BD TOPO®) dont une est principalement constituée de chênes (d'après la Carte Forestière V1).

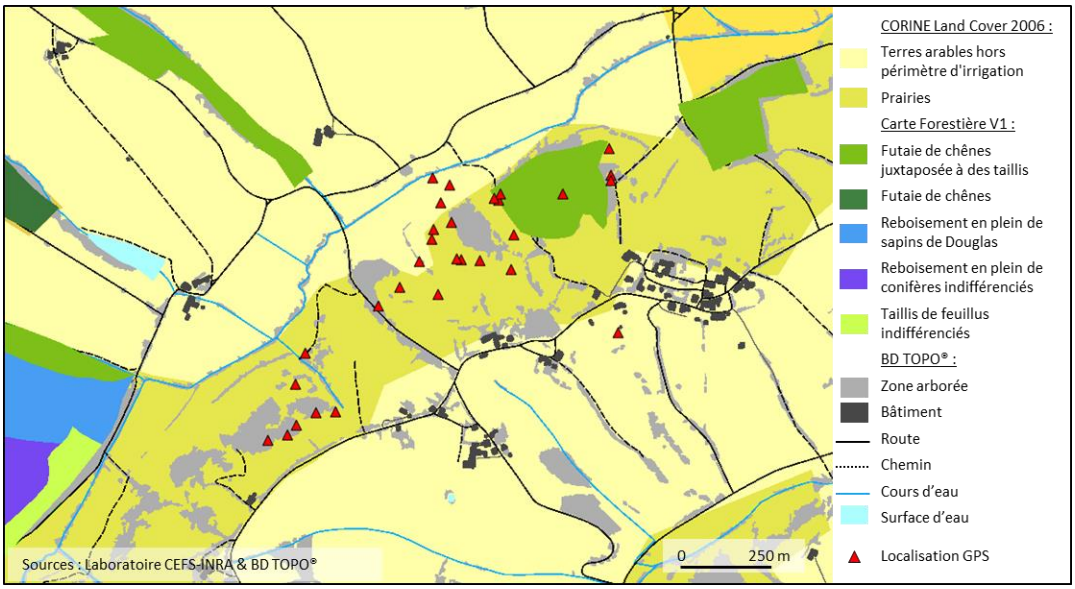


Figure III.41. Visualisation superposée des données de la BD TOPO®, de la Carte Forestière V1 et de la base CORINE Land Cover de 2006 sur une partie de la zone d'étude englobant l'espace parcouru par un chevreuil pendant 10 jours, espace estimé à partir des enregistrements GPS.

Grâce au deux cas d'étude sur les chevreuils, nous pouvons constater que cette espèce est présente dans des occupations du sol diverses et que la sélection de l'habitat peut s'effectuer en milieu forestier (site des Vosges) et en milieu agricole et boisé fragmenté (site d'Aurignac). Les deux sites d'étude présentent une densité faible de bâtiments ainsi qu'une majorité de chemins et de routes de trafic faible ou moyen. La caractérisation des déplacements des animaux par rapport à des éléments potentiellement d'intérêt (végétation) et à des obstacles probables (routes) est étudiée dans la partie suivante.

2.3. Le rôle des éléments du paysage sur les déplacements

Cette partie est consacrée à la caractérisation de l'influence des éléments du paysage sur les choix de déplacements des animaux. La caractérisation s'effectue à un niveau plus local par rapport aux localisations des animaux que pour l'étude de la sélection des domaines vitaux (ou des espaces parcourus). L'identification des éléments du paysage favorables ou faisant frein aux déplacements des animaux appellent à des comparaisons. Nous caractérisons alors le voisinage spatial des animaux. Le voisinage proche des localisations est comparé avec la composition des espaces parcourus. Nous faisons ensuite varier la distance du voisinage autour des localisations et des traces et nous analysons l'effet de cette variation. Si les animaux se tiennent éloignés ou à proximité de certains éléments du paysage, nous pouvons émettre des hypothèses concernant leur influence sur la situation des animaux dans un espace pouvant être potentiellement parcouru. La même approche est adoptée pour l'étude du voisinage des traces linéaires, même si elles sont imprécises par rapport aux trajets effectués non connus.

2.3.1 La situation des animaux par rapport à leur domaine de vie

Nous nous concentrons sur l'identification des lieux préférentiels de déplacement dans les domaines vitaux, c'est-à-dire un espace exploité pendant plusieurs jours par les animaux. Nous utilisons donc ici les localisations enregistrées des renards pendant plusieurs journées sur le site d'Annemasse. Nous comparons la composition des domaines de vie, déjà étudiée dans la partie

précédente, et la composition du voisinage des localisations connues. Les déplacements ne sont pas estimés car les intervalles de temps entre les points connus sont longs. Les enregistrements ponctuels permettent d'identifier d'éventuelles préférences dans le choix de localisation des renards, choix liés à des motivations de déplacements. La mise en œuvre de la comparaison concerne le domaine de vie estimé par enveloppe convexe et le voisinage des localisations obtenu par une zone tampon de 50 m de rayon, distance couvrant ainsi l'imprécision des coordonnées. Nous notons que les surfaces des zones arborées sont proportionnellement plus importantes autour de la trace que dans le domaine vital. À Annemasse, le rapport entre le pourcentage de surfaces arborées autour des localisations et celui observé dans le domaine vital est égal à 1,3. Les surfaces d'activités industrielles ou commerciales sont par contre proportionnellement moins présentes autour des localisations (rapport de 0,3), de même pour la densité de bâtiments (rapport inférieur à 0,1). Le voisinage des localisations contient proportionnellement davantage de chemins et de sentiers et moins de routes motorisées. Cette caractérisation de l'environnement spatial des localisations peut traduire une préférence dans les lieux de déplacements des renards.

La comparaison entre la composition du domaine vital et les localisations des animaux permet de préciser des préférences de situation des animaux par rapport à l'espace qui pourrait être utilisé, notamment pour les déplacements. Sur le site d'Annemasse, il semble que les renards favorisent une proximité à la végétation arborée et se tiennent éloignés des routes. Les individus ne semblent parcourir que faiblement les surfaces d'activités même si celles-ci sont présentes dans leur domaine de vie. Ce constat serait à préciser avec d'autres individus et d'autres sites.

2.3.2. Les éléments du paysage parcourus et évités par les animaux lors de leurs déplacements par rapport à la composition de leur espace parcouru

L'espace parcouru par les animaux estimé par enveloppe convexe représente un espace potentiellement parcouru. Cet espace n'est pas parcouru avec la même intensité, comme nous l'avons montré à l'aide d'une méthode par densité de points en III-1.2. Nous souhaitons à présent préciser les lieux de passage et les lieux évités. Nous partons de l'hypothèse que les animaux se situent et se déplacent dans ou à proximité d'occupations du sol pouvant être considérées comme favorables au déplacement. Ils se trouvent par contre loin des occupations du sol et des éléments du paysage défavorables ou qui font obstacle. Nous étudions pour cela le voisinage des localisations et des traces linéaires et nous analysons la composition en éléments du paysage en faisant varier la distance de voisinage.
Nous avons étudié les cas des renards à Nancy et des cervidés dans les Vosges qui correspondent à des localisations GPS avec des fréquences temporelles élevées permettant une estimation des déplacements par la trace linéaire. Le voisinage est extrait dans une zone tampon dont le rayon varie entre 5 m et 1 km, c'est-à-dire entre une distance inférieure à la précision des données estimée à 20 m et une distance très grande pouvant révéler des préférences spatiales plutôt au niveau de l'habitat. La composition en éléments du paysage est étudiée en fonction du rayon de ces zones tampon, par thème d'occupation du sol et par individu. L'extraction des données géographiques contenues dans les zones tampon s'effectue différemment selon les thèmes. Certains thèmes comme la végétation ont des implantations surfaciques. La superficie de la végétation comprise dans la zone tampon est alors calculée. Pour d'autres thèmes comme les routes, la longueur ainsi que le nombre d'objets présents dans la zone tampon sont des indicateurs plus adaptés que la superficie car la géométrie est linéaire. Des informations attributaires sont également extraites : natures (ou types) des voies, fonction des bâtiments, type de peuplements forestiers si l'information est disponible. Les informations sur le relief

contenues dans le MNT sont exploitées en extrayant les pixels compris dans les zones tampon et en les caractérisant. Les principales données géographiques du RGE® analysées lors de la caractérisation de la proximité et de la composition du voisinage spatial, sont les suivantes :

- les bâtiments : nombre et nature ;
- les routes : nombre, nature, classement, importance, largeur ;
- les zones d'activités et zones industrielles : superficie ;
- la végétation : superficie, nature ;
- l'hydrographie : nombre et superficie s'il s'agit d'une étendue d'eau, indication sur l'état permanent ou non des cours d'eau ;
- le relief : moyenne, valeurs minimale et maximale des altitudes et des pentes.

Pour les bases Carte Forestière version 1 et version 2, les analyses concernent la superficie et la nature des essences principales. Pour la base CORINE Land Cover, les informations sont également la superficie et la nature de l'occupation du sol (voir les cartes en Annexe 1). Nous présentons les résultats les plus pertinents ci-dessous.

Les lieux de déplacements des renards à Nancy

Le cas d'étude des renards dans la zone périurbaine de Nancy est illustré par les cartes avec différentes sources de données géographiques en Annexe 1. Le pourcentage de surface des zones arborées est plus important à proximité de localisations (50 % de la surface pour un voisinage de 20 m) et diminue lorsque le rayon du voisinage considéré s'agrandit (34 % pour un voisinage de 500 m), comme illustré en Figure III.42.b. Cette diminution peut indiquer une préférence des renards pour être au voisinage des zones arborées. Nous avons ensuite comparé ces pourcentages en zone arborée autour des localisations avec celui dans le domaine de vie de chaque individu qui est en moyenne de 32 %. Nous constatons que pour trois renards (1, 3 et 4), les pourcentages dans un voisinage jusqu'à 50 m des localisations sont plus élevés rapport au domaine de vie. Pour le renard 2, les localisations sont en moyenne situées dans un voisinage plus arboré que dans la composition de leur domaine de vie quel que soit le rayon considéré. Cela peut être dû à la présence d'un bois dans lequel le renard reste pendant la période diurne, ainsi qu'à la présence d'autres bois et zones arborées à proximité du bâti d'une commune qu'il aborde pendant la nuit.

Concernant les voies de communication, nous avons comparé dans les différents buffers la répartition des routes motorisées et des voies d'accès piéton ou cycliste. Celles-ci sont équivalentes pour les trois individus suivis en milieu périurbain dense : les renards 1 et 3 ainsi que le renard 4 correspondant à la Figure III.42.a droite. Les voies motorisées à une chaussée sont majoritaires même à proximité des localisations à partir de 5 m de rayon. Cette répartition suit en fait la répartition des types de voies dans le site d'étude comme nous pouvons le constater en élargissant le voisinage considéré. Pour le renard 2 (Figure III.42.a gauche), la majorité des voies de communication à proximité des localisations concernent les chemins et les routes non goudronnées (empierrées). Comme pour l'étude de la végétation arborée, ceci peut être lié au type d'environnement composé de bois et de cultures en lisière d'une commune. Pour les bâtiments en Figure III.42.c, le pourcentage de localisations à proximité d'une construction augmente rapidement de 5 m à 100 m entre 10 % et 80 %. Nous remarquons également le renard 2 situé dans un espace avec un tissu urbain peu dense.

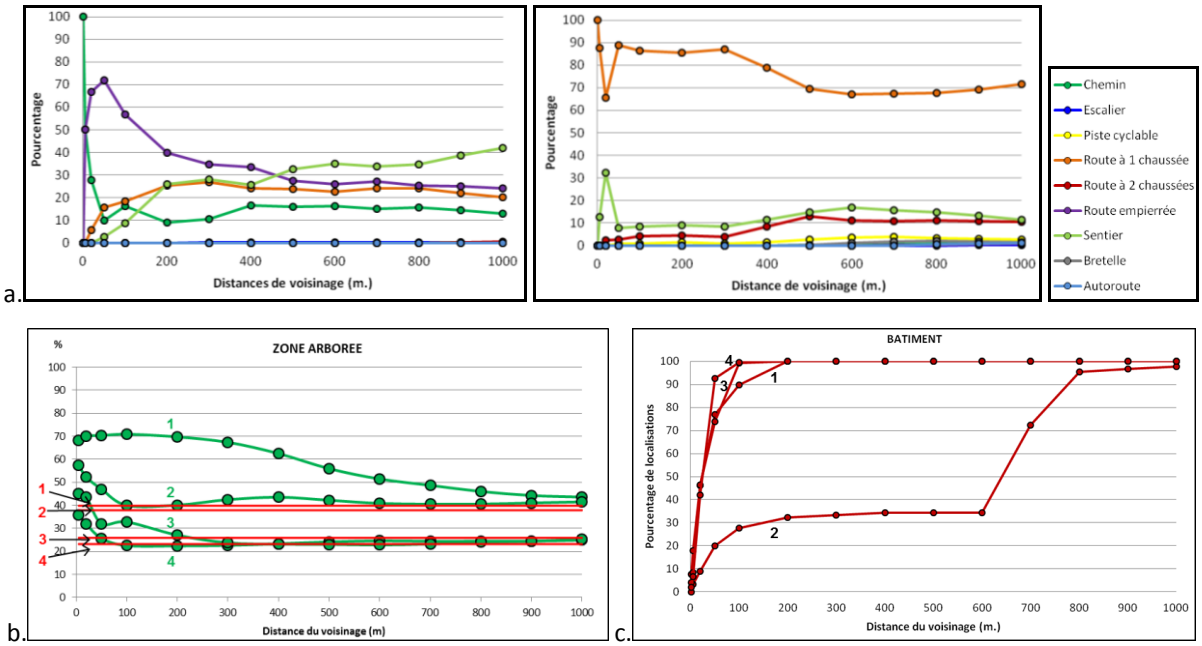


Figure III.42. Effet de la variation du rayon du voisinage considéré entre 5 m et 1000 m autour des localisations : a) la répartition selon le type de voie de communication, exemple d'un renard en zone périurbain dense (gauche) et d'un renard en milieu peu urbanisé (droite), b) le pourcentage de végétation arborée, les pourcentages en végétation arborée des espaces parcourus individuels sont indiqués en rouge, c) le pourcentage de localisations ayant au moins un bâtiment dans leur voisinage.

Si l'on considère les traces linéaires interpolées majorées d'une zone tampon d'un rayon variable et non les localisations ponctuelles, la variation de la composition en élément du paysage diffère légèrement. C'est le cas du pourcentage de zone arborée diminuant progressivement de 35 % à 32 % en moyenne par individu alors que le rayon augmente de 20 m à 1000 m. Cette diminution est nettement moins prononcée lorsque l'on considère les localisations ponctuelles (diminution de 50 % à 34 %). Cela peut être dû à l'approximation des traces linéaires mais il n'est pas évident d'en quantifier l'importance. Nous nous retrouvons dans le même type d'interrogation que pour l'étude des pentes dont les valeurs différaient entre les localisations et les traces en III-2.1.4.
Nous avons mené le même type d'analyse du voisinage à partir de l'occupation du sol CORINE Land Cover. Cette analyse est intéressante pour comparer la composition en occupations du sol dans un voisinage plus ou moins proche des localisations par individu, puis par rapport à leur espace parcouru. Nous retrouvons en préférences locales, les mêmes que les préférences en termes de sélection des espaces parcourus (III-2.2.1), ce qui est logique vu l'échelle spatiale de la base. Quelques nuances cependant : par exemple, la préférence des renards à Nancy pour les zones industrielles et commerciales est plus marquée à proximité des localisations (contrairement au cas d'Annemasse étudié dans la partie précédente). Les animaux se situent par contre moins à proximité de l'occupation du sol « tissu urbain discontinu » par rapport à sa présence dans les espaces parcourus. Ceci pourrait montrer qu'en milieu périurbain dense, les renards utilisent préférentiellement des zones moins peuplées et contenant potentiellement des lieux d'intérêt comme de la végétation ou des sources alimentaires d'origine anthropique.

Les lieux de déplacements des cervidés dans les Vosges

Pour ce cas d'étude, nous avons étudié principalement le voisinage des localisations des cervidés par rapport aux voies de communication et par rapport aux types de peuplements forestiers. Ces deux thèmes nous ont semblé pertinents à étudier pour les préférences locales de situation au vu des analyses précédemment menées.

Pour les voies de communication, les localisations sont plus proches des chemins que des autres types de voies jusqu'à 100 m de voisinage. Au-delà de 100 m, la composition en types de voies dans le voisinage des localisations est équivalente à celle des domaines vitaux.
L'étude de la composition en peuplements forestiers à partir des informations de la BD TOPO® confirme une sélection par les chevreuils des zones avec des feuillus majoritaires. La Figure III.43 indique la variation du pourcentage en feuillus autour des localisations. Ce pourcentage diminue en moyenne de 80 % (voisinage de 20 m) à 70 % (voisinage de 300 m). Entre 300 m et 500 m, la composition en feuillus est proche de celle des espaces parcourus individuels qui ont 70 % de feuillus. À partir de 500 m, l'évolution de la composition varie peu. Ceci pourrait signifier une sélection dans les choix de lieux à l'intérieur du domaine vital. Pour les trois cerfs suivis, aucune préférence n'est marquée dans le voisinage des localisations. Seul un individu se situe davantage à proximité des conifères et des peuplements mixtes que des feuillus, jusqu'à 300 m de voisinage. Les graphes pour les autres éléments du paysages sont présentés en Annexe 9.

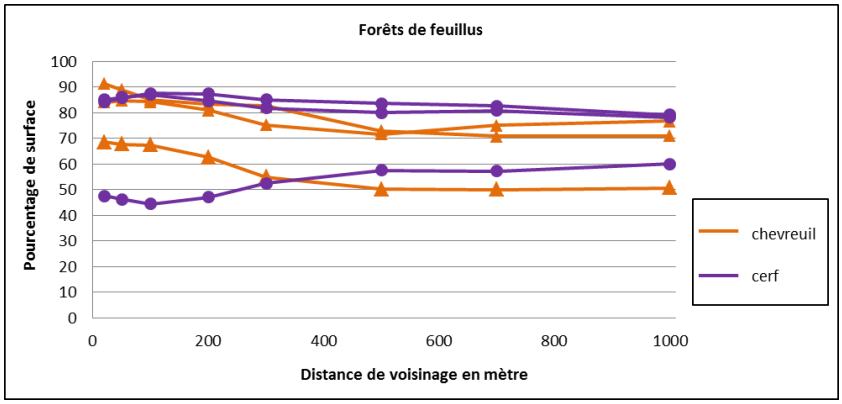


Figure III.43. Pourcentage en surface en forêt de feuillus en fonction du rayon du voisinage considéré autour de localisations des trois chevreuils et des trois cerfs.

La Carte Forestière V2 précise les préférences en essences conformément aux préférences relevées précédemment, c'est-à-dire dans les feuillus. La Figure III.44 montre la répartition des localisations des chevreuils et des cerfs dans les différents peuplements forestiers.

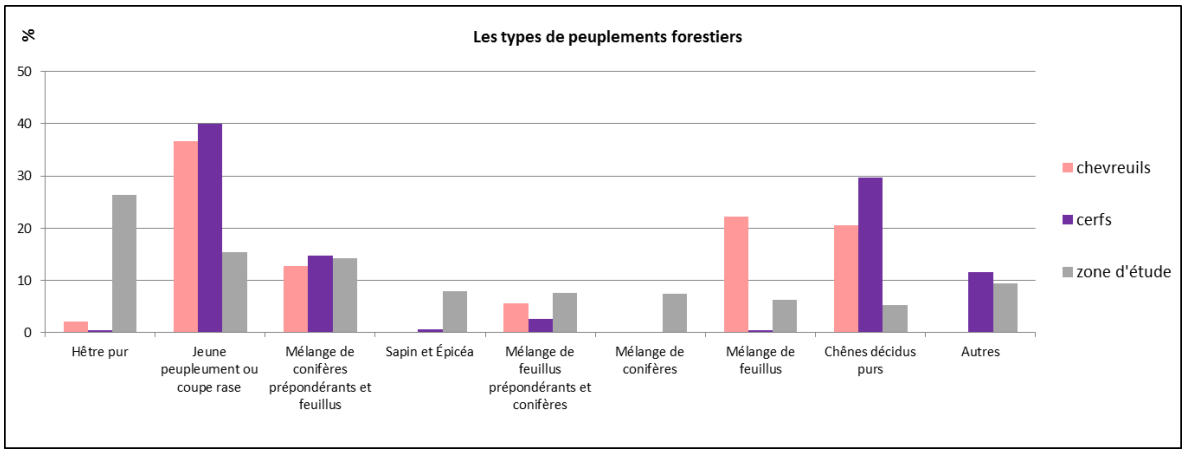


Figure III.44. Les pourcentages des localisations des chevreuils et des cerfs par type de peuplements principaux d'après la Carte Forestière V2.

La comparaison entre les localisations des chevreuils et des cerfs et leur espace parcouru montre qu'une sélection s'effectue à l'intérieur de ces espaces. Le type « jeune peuplement ou coupe rase ou incident » est surreprésenté dans les espaces autour des localisations (rayon de 5 m) par

rapport aux espaces parcourus pour les deux espèces : le rapport eset égal à 1,7 pour les chevreuils et à 1,3 pour les cerfs. Le type « chêne décidus purs » est surreprésenté pour les cerfs (rapport de 2,1) et le type « mélange de feuillus » pour les chevreuils (rapport de 2,9). Les hêtres purs sont par contre en forte sous-représentation autour des localisations : 1 % de la composition alors qu'il est présent à 15 % en moyenne dans les espaces parcourus. Les rapports pour les chevreuils et les cerfs sont environ de 0,1.

Les lieux de déplacements des chevreuils à Aurignac

Nous décrivons la composition du voisinage spatial sur l'ensemble des traces linéaires interpolées pour les suivis des chevreuils en 2008. Les résultats ne nous ont pas permis de conclure sur des comportements généraux de préférence spatiale, même si deux remarques peuvent être énoncées. La première concerne l'importance de l'environnement dans lequel vivent les chevreuils. La superficie des zones arborées autour des traces majorées d'une zone tampon de 50 m varie entre 15 % et 95 % selon les individus d'après la BD TOPO®, et entre 1 % et 95 % d'après la Carte Forestière V1. Les chevreuils vivant dans la partie forestière du site d'étude se distinguent des autres individus vivant entre de petites zones arborées et des zones d'activités agricoles. Les informations données par la Carte Forestière V1 sont alors intéressantes pour distinguer les types d'essences : en majorité pour les chevreuils en milieu forestier, les traces se situent dans les types « reboisement en bandes de conifères indifférenciés ». Pour l'ensemble des chevreuils, les traces se situent en majorité dans des forêts à chênes dominants, traités en futaie et en taillis. Il s'agit en fait du peuplement majoritaire dans les domaines vitaux qui représente un peu moins de 10 % de leur superficie. Ce peuplement est légèrement plus présent autour des localisations dans un voisinage de 50 m, représentant 12 % en moyenne des superficies. La seconde remarque porte sur l'identification de certains éléments présents dans le voisinage des traces. L'analyse systématique des thèmes géographiques met logiquement en évidence la présence de plusieurs cours d'eau, de zones arborées ainsi que des infrastructures routières, en majorité des routes motorisées puis des chemins autour des traces comme dans la composition des domaines vitaux. D'autres thèmes présents plus remarquables car moins nombreux sur le site, sont les ponts, les barrages et les bâtiments industriels. Les traces sont situées en moyenne dans des zones légèrement plus élevées que dans les domaines vitaux. Cela est peu significatif car l'écart-type entre les individus est grande (de 40 m), et la différence entre localisations et les domaines vitaux est faible, de 5 m en moyenne, et si l'on considère non pas les domaines vitaux mais tout le site d'étude, les pentes sont supérieures de 15 m pour les localisations.

Des préférences locales peuvent être remarquées pour les renards en milieu périurbain à partir de l'étude du voisinage plus ou moins proche des localisations. Il apparaît que les renards semblent se tenir à proximité des zones arborées de manière préférentielle par rapport à la composition de leurs espaces parcourus. Concernant les routes, nous n'avons pu déceler une proximité ou un évitement important, contrairement aux hypothèses émises sur leur rôle d'obstacle suite aux analyses des traversées des voies.
Pour les cervidés, les préférences locales concernent, comme pour la sélection des espaces parcourus, les types de peuplements forestiers. Les chevreuils et les cerfs semblent se situer à proximité des peuplements de feuillus ainsi que des jeunes peuplements.
Dans le cas des chevreuils en milieu agricole et boisé fragmenté, les déplacements restent en milieu forestier lorsque ce milieu est majoritaire dans le domaine vital. Nous n'avons pas pu identifier de préférences spatiales claires entre les lieux de déplacements et les domaines de vie par notre méthode de comparaison.

2.3.3. Le rôle des éléments du paysage sur les déplacements quotidiens et sur les déplacements de longues distances : cas des chevreuils sur le site d'Aurignac

Nous utilisons le cas d'étude des chevreuils dans le canton d'Aurignac afin de déterminer les rôles possibles des éléments du paysage sur deux types de déplacements : les déplacements quotidiens dans l'espace parcouru habituel qu'est le domaine vital, et les déplacements plus exceptionnels sur de longues distances en dehors des domaines vitaux. L'échantillon de données correspond aux années 2008, 2009 et 2010, et comprend 70 individus. L'objectif dans cette partie n'est pas de conclure sur des préférences spatiales générales à partir de tous les individus, mais de détecter si des traversées d'obstacles potentiels, comme de grandes infrastructures, ont lieu et si des éléments du paysage semblent influencer sur les choix de déplacements en s'appuyant sur des extraits de déplacements individuels.

Les types de déplacement considérés

Pour les déplacements quotidiens, nous utilisons l'estimation des domaines vitaux présentés en III-1.2. Pour les déplacements en dehors des domaines vitaux, nous avons proposé une méthode pour extraire ces déplacements, décrite dans la partie III-1.4.2. Nous avons retenu les déplacements longs en ne conservant que ceux qui s'éloignent au minimum de 1 km des cœurs des domaines vitaux. Afin d'éviter de prendre en compte des points avec des coordonnées erronées, nous sélectionnons les déplacements décrits par au moins deux relevés successifs. L'étude des relations entre l'espace et ces déplacements met en évidence plusieurs comportements d'occupation de l'espace ainsi que de types de parcours de cet espace. Le lien entre la présence dans une partie de l'espace et la durée de cette présence est important. Il existe sous différentes formes que nous classons ci-dessous.

- Les domaines vitaux peuvent être composés de plusieurs zones séparées entre elles d'au moins 1 km. Ces zones font l'objet d'allers-retours par les individus. Elles peuvent être exploitées pendant une certaine durée et à une certaine saison. Par exemple, un des chevreuils exploite une zone de cultures pendant les mois de juillet et d'août et le reste du temps, il se situe dans une partie de son domaine vital comportant davantage de zones arborées.
- Les dispersions définitives sont le fait de jeunes individus qui migrent afin de définir un domaine vital éloigné de celui d'origine. Il n'y a alors par de retour. Ces déplacements de dispersion peuvent s'effectuer sous la forme d'un trajet unique avec le parcours de longues distances pendant quelques jours. Ces déplacements peuvent aussi s'effectuer avec des explorations préalables dans la direction ou non du futur domaine de vie. Des glissements à partir du domaine de vie d'origine sont également observés. Dans les observations de 2008, 5 individus sur les 24 suivis ont opéré une dispersion définitive. Les distances séparant les domaines de vie initiaux des nouveaux sont égales à environ 5 km, et pour un des chevreuils à 20 km. Dans l'échantillon de 2009, une distance de plus de 50 km est observée, illustrant la possibilité pour les chevreuils de parcourir de grandes distances.
- Les déplacements d'exploitation d'un lieu sur une durée courte de quelques heures ou de quelques jours maximum peuvent concerner des distances de plus d'un km par rapport au cœur du domaine vital. Ces déplacements concernent tous les individus de l'échantillon : en moyenne chaque chevreuil effectue ce type de déplacement pouvant être exploratoire entre une fois et cinq fois dans l'année.

La temporalité des relevés est importante car selon la saison et donc selon le cycle biologique des chevreuils, les déplacements sont restreints à une zone ou sont au contraire effectués sur de longues distances qui confrontent les individus à des obstacles.

Identification de l'influence des éléments du paysage sur les différents types de déplacement

Nous avons d'abord regardé l'influence des grandes infrastructures sur les déplacements. Ces infrastructures, routières ou hydrographiques par exemple, sont reconnus comme pouvant avoir un effet de barrière sur les déplacements des animaux comme les chevreuils (Cosson *et al.*, 2006). Pour les éléments du paysage moins remarquables que les grandes infrastructures sur la zone d'étude, nous avons relevé des influences probables des éléments du paysage sur les localisations des chevreuils. Les remarques sont formulées ci-dessous selon le rôle de frein ou en faveur des déplacements des éléments du paysage.

- Les freins au déplacement

  - Les grandes infrastructures :

Nous avons vérifié si les déplacements observés rencontrent des grandes infrastructures de transport ou des grands obstacles naturels comme des fleuves reconnus comme pouvant freiner les déplacements. Les animaux semblent s'approcher de ces infrastructures seulement lors de déplacements en dehors de leurs domaines vitaux. Aucune autoroute ni route à chaussées séparées n'est croisée par les traces. Seulement deux individus ont des déplacements les amenant à proximité de ces éléments remarquables du paysage. Dans l'échantillon de 2009, un individu effectue un déplacement temporaire en dehors de son domaine de vie habituel. Il arrive à proximité de l'autoroute 64 au sud du site d'étude, à 100 m de distance, avant d'amorcer son retour. Il ne la traverse pas. Un autre individu, dont un extrait du déplacement est illustré en Figure III.45, a une dispersion éloignée de son domaine de vie d'origine.

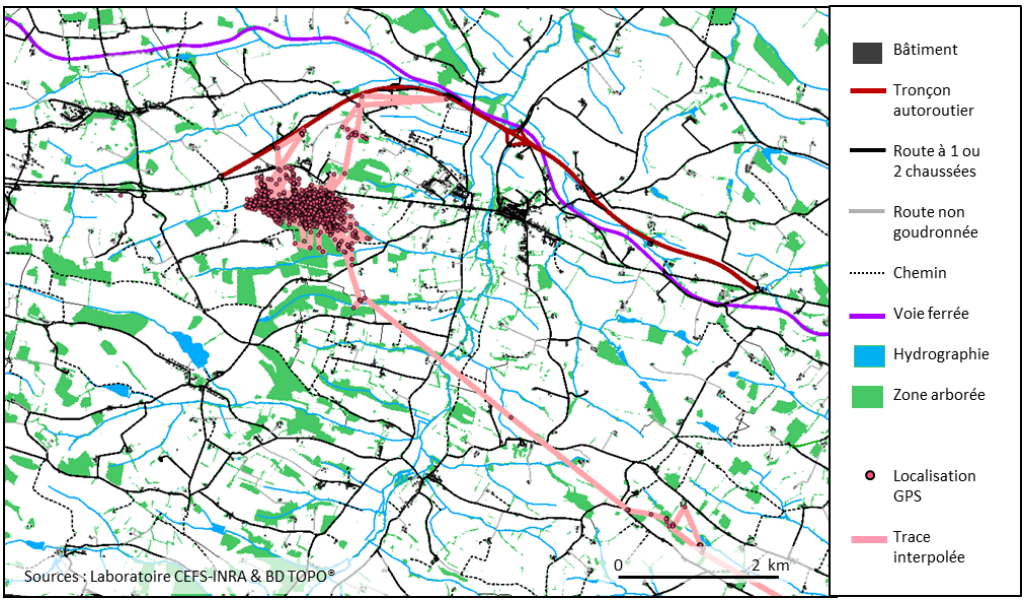


Figure III.45. Établissement d'un nouveau domaine vital par un chevreuil à la suite d'un trajet de 10 jours d'environ 55 km par rapport à son lieu de naissance. Ce domaine se situe au sud d'un tronçon autoroutier associé à une voie ferrée, tous deux non traversés.

Le chevreuil en Figure III.45 traverse une route à trafic important, la départementale D632 ainsi qu'un large affluent de la Garonne, la Save. Aucun élément de passage n'est cartographié à proximité, ce qui indiquerait une traversée à la nage. Il établit ensuite son domaine vital à 500 m environ au sud d'une route nationale avec des portions autoroutières. Il ne la traverse pas, même si la localisation la plus proche est enregistrée à moins de 20 m, ce qui peut signifier un effet de barrière. Une voie ferrée est associée au nord de la route nationale, renforçant potentiellement cet effet de barrière. Plusieurs traversées de rivières larges (modélisées par des

surfaces dans la BD TOPO®) sont observées, une localisation est même enregistrée dans une rivière, même s'il peut s'agir d'une imprécision des coordonnées. Plusieurs localisations sont enregistrées dans l'étendue d'eau au sud de la Forêt de Fabas (voir la carte de présentation du site d'étude en II-2.2.5) mais il peut aussi bien s'agir de coordonnées imprécises.

- Les autres éléments du paysage :

Les routes motorisées semblent avoir une influence de frein aux déplacements par deux aspects : celui de la détermination du domaine vital et celui d'une restriction des déplacements quotidiens. Sur le site d'étude, la majorité des routes sont à une chaussée. Relativement peu de traversées sont observées à partir des traces linéaires : 1 % des segments croisent des routes à une chaussée. Les domaines de vie sont délimités par les routes. Cela peut être en partie dû à leur effet de barrière, par le trafic et le changement d'occupation du sol, et aussi par la correspondance entre les frontières de champs de cultures et les routes. L'influence des routes est également observée en lien avec d'autres éléments du paysage, comme le relief et l'hydrographie. Une des routes principale est par exemple située sur une crête autour de 360 m d'altitude. Elle surplombe une zone de culture autour de 300 m d'altitude exploitée par sept des chevreuils suivis en 2008. Sur la Figure III.46, l'effet des routes est illustré sur deux zones exploitées par des chevreuils pendant un peu moins d'une année. La Figure III.46.a illustre la délimitation d'un domaine vital au sud-est par deux routes : celles-ci sont traversées à 70 reprises d'après l'analyse spatiale des 1200 segments de la trace, en majorité vers les champs de culture au sud. La Figure III.46.b montre un domaine vital réparti entre deux zones de part et d'autre d'une route et éloignées environ de 200 m. Le nombre de traversées est estimé à 130 sur environ 4500 enregistrements pendant une année, représentant 3 % des segments de déplacements.

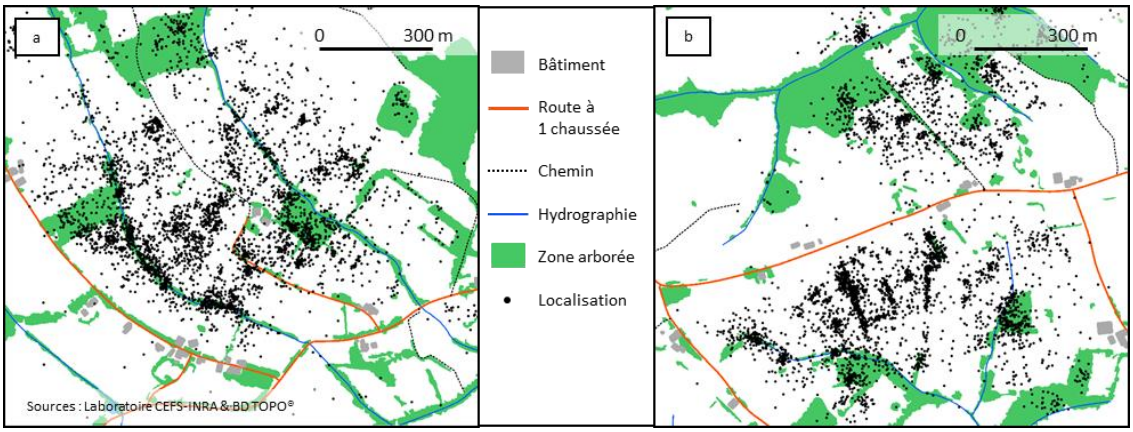


Figure III.46. Influence des routes sur la détermination des espaces parcourus par deux femelles adultes chevreuil pendant 11 mois : a) le rôle de la route est conjoint avec la délimitation des cultures et la présence de zones arborées, b) une route sépare deux parties du domaine vital et est peu traversée.

Lors des déplacements sur de longues distances, que ce soit pour des dispersions définitives ou des explorations, les traversées de routes ont lieu et n'arrêtent pas les trajets. Sur la Figure III.47.a, la dispersion définitive d'un jeune individu est cartographiée entre son lieu de naissance et son nouveau domaine vital à 20 km l'un de l'autre à vol d'oiseau. Le trajet s'est déroulé sur une quinzaine de jours et s'est effectué sur un parcours de 24 km. 32 tronçons de routes sont estimés traversés dont seulement 4 avec un trafic d'importance moyenne et le reste d'importance faible. 29 cours d'eau sont traversés. La Figure III.47.b représente une excursion temporaire pendant 10 jours sur environ 10 km en trajet aller et 10 km au retour. Dans ce cas, 14 routes sont traversées dont une seule avec un trafic de moyenne importance.

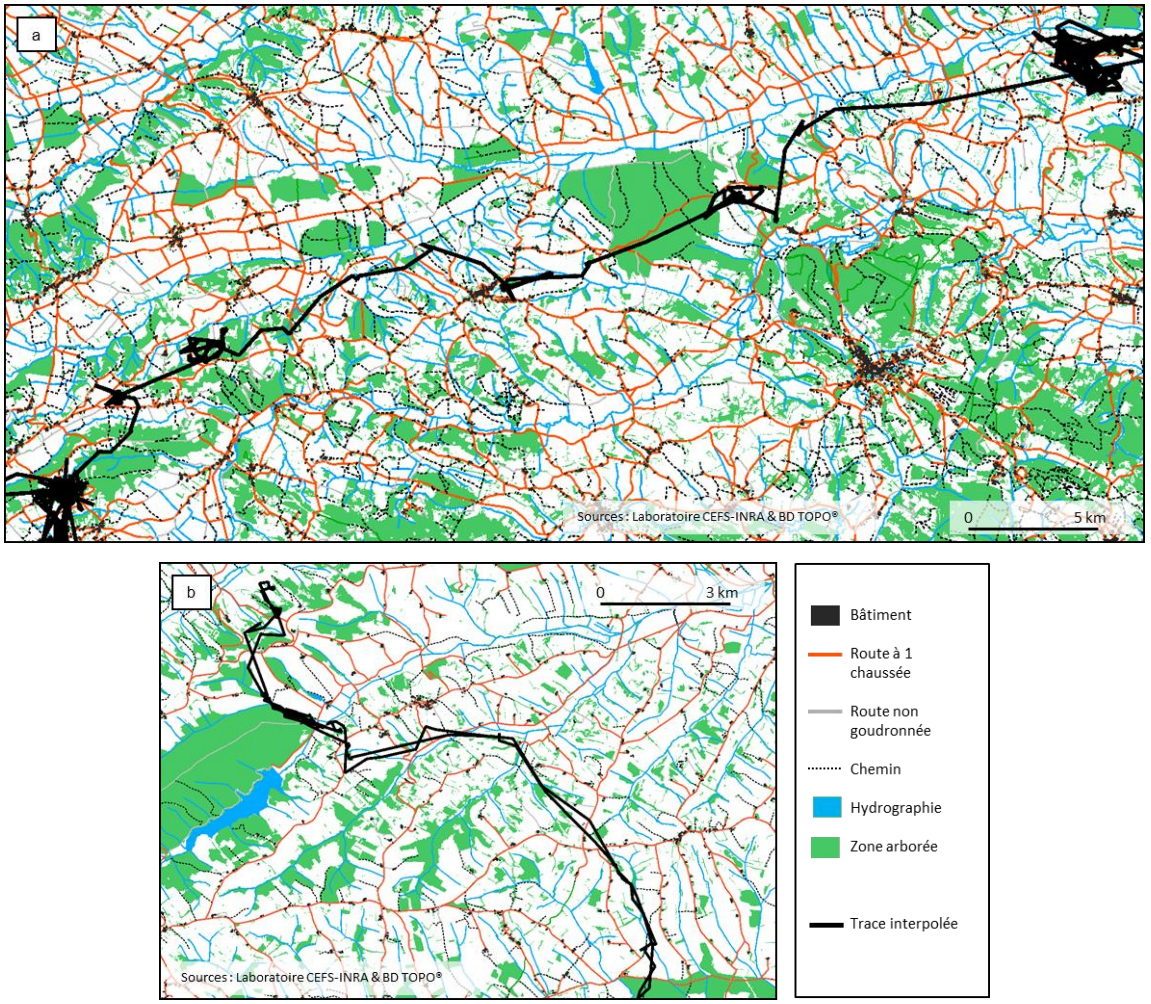


Figure III.47. Deux exemples de déplacements sur de longues distances, 20 km de trajet chacun, et de traversées de routes, a) lors d'une dispersion définitive du lieu de naissance au nord-est à un lieu situé au sud-ouest, b) lors d'une excursion temporaire à partir du domaine vital situé au sud.

- Les influences d'attraction ou en faveur des déplacements

- Le couvert arboré :

Les zones arborées représentent un intérêt pour les chevreuils, que leur superficie soit grande ou petite. Sur l'échantillon des suivis de 2008, elles occupent en moyenne 28 % (entre 12 et 82 % selon les individus) des espaces parcourus estimés par enveloppe convexe et 33 % (entre 14 et 95 %) dans un voisinage de 50 m autour des traces linéaires. Ces zones arborées représentent une composante essentielle dans la caractérisation du type d'habitat utilisé par les individus au cours d'une année de suivi. Ce type d'habitat influence leurs déplacements. La Figure III.48 représente le lien entre le type d'habitat principal et les superficies des enveloppes convexes des localisations des chevreuils qui incluent les déplacements quotidiens et les déplacements sur de longues distances. Nous nous appuyons sur une caractérisation de l'habitat en forêt lorsque la composition de l'espace parcouru en zone arborée est supérieure à 40 % de couvert, en forêt et culture lorsque le taux de couvert est compris entre 20 et 40 % et en culture lorsque le taux est inférieur à 20 %. Les chevreuils ayant établi un domaine de vie en milieu uniquement forestier ont tendance à rester dans un espace plus restreint. Ils ont également tendance à moins se déplacer. En effet, la corrélation entre la surface des espaces parcourus et les distances effectivement parcourues est significativement positive avec un coefficient de Bravais-Pearson

égal à 0,55 (cf. III-1.3.1, Figure III.9), ce qui montre une relation positive entre les deux même. Ces résultats sont cependant à moduler car le nombre d'individus vivant en milieu forestier n'est que de 3 (tous en Forêt de Fabas), de 9 en zone de cultures associées à de la forêt et de 12 en zone de cultures.

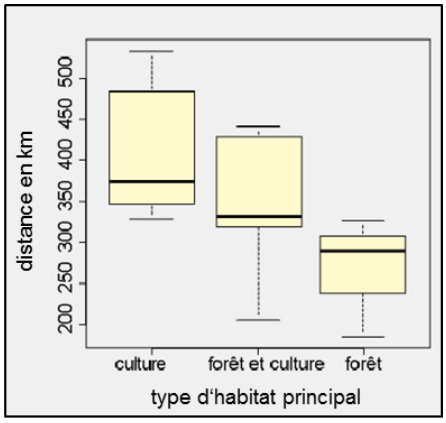


Figure III.48. Distances parcourues par les chevreuils dans trois types d'habitat. Les calculs ont été réalisés sur les 24 chevreuils suivis en 2008, chacun pendant une période de 10 mois.

- Les structures linéaires de végétation :

Nous nous sommes intéressée à la structure des zones arborées. Dans l'état de l'art, nous avons vu que les structures végétales linéaires comme les haies étaient des éléments du paysage particulièrement intéressants pour les animaux. Nous avons utilisé un algorithme développé par Touya *et al.* (2010) afin d'extraire les haies et les bosquets des données de végétation de la BD TOPO®. Nous présentons la méthode en Annexe 10. Cet algorithme prend en compte un critère de largeur des éléments de moins de 25 m afin de distinguer les haies ou les bosquets des autres zones arborées. Puis en fonction de la convexité des objets extraits, l'élongation (pour les objets convexes) ou la compacité (pour les objets concaves) sont calculées afin de séparer les haies des bosquets. Nous avons implémenté cet algorithme pour obtenir une couche de végétation renseignée sur la structure. Ces informations sont en particulier intéressantes en Haute-Garonne, où le couvert arboré est fragmenté et où les haies peuvent faciliter les déplacements. Concernant les calculs de composition autour des traces linéaires, l'étude du couvert en haies par rapport à celui des autres zones arborées ne permet par de détecter de préférence générale pour une structure plutôt qu'une autre. Il est cependant possible d'émettre l'hypothèse d'une utilisation des haies, comme illustrée en Figure III.49. Dans les suivis sur deux individus pendant une journée, on constate que la moitié des localisations sont enregistrées dans des zones arborées et en particulier dans ou à proximité de moins de 20 m des haies (63 % des localisations en (a) et 42 % en (b)). L'utilisation des haies et des bois semble conjointe, par exemple les chevreuils peuvent utiliser les haies pour relier deux bois (Figure III.49.b). Les haies peuvent par ailleurs être associées à un cours d'eau et sont de même parcourues par les chevreuils.

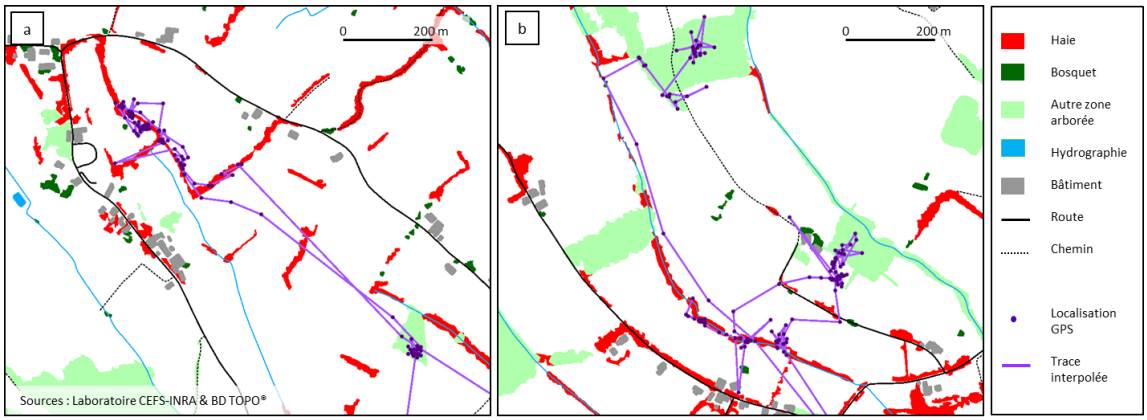


Figure III.49. Parcours des zones arborées et en particulier des haies par deux chevreuils femelles adultes : a) suivi d'un individu pendant 20 h, b) suivi d'un autre individu pendant 24 h, ici la haie parcourue est associée à un cours d'eau.

- Les autres éléments du paysage :

Nous avons remarqué que des éléments linéaires autres que les haies sont empruntés. C'est le cas des chemins (Figure III.50.a) et des cours d'eau (Figure III.50.b) associés ou non à de la végétation. Les chevreuils utilisent probablement les chemins pour se déplacer lorsqu'ils n'ont pas la nécessité de se cacher, car ce sont des zones peu encombrées par la végétation et qu'il est facile de s'y mouvoir. Les bords de cours d'eau et de chemins peuvent aussi représenter des zones attractives pour les ressources alimentaires avec la présence d'espèces végétales intéressantes comme dans certains lieux le frêne et le merisier (Pereira, 2006).

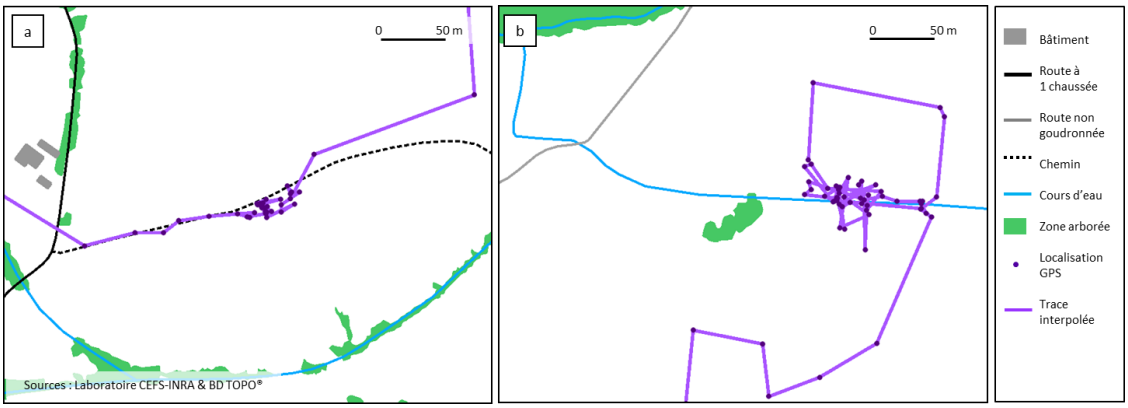


Figure III.50. Les chevreuils longent les éléments linéaires du paysage : a) les chemins, les relevés couvrent une période de 7 heures, b) les cours d'eau, ici pendant 9 heures.

Une utilisation préférentielle des cours d'eau associés à des zones de végétation est vérifiée en analysant la situation des localisations par rapport à la composition du domaine vital estimé. En Figure III.51.a, les localisations sont enregistrées pendant une année pour un chevreuil. Elles sont réparties entre une forêt au sud pour environ 40 % d'entre elles et une zone au nord classée en terres arables dans la base CORINE Land Cover pour les 60 % restant. En dehors de la forêt, nous remarquons que le chevreuil est relativement peu présent au milieu des cultures. Il reste à proximité des zones arborées ainsi que des cours d'eau. Plus de la moitié (51 %) des localisations sont à moins de 20 m des zones arborées et environ 25 % d'entre elles des cours d'eau. Ces chiffres sont respectivement de 74 % et 42 % si l'on considère une distance de 50 m. L'influence favorable de ces deux éléments du paysage est également constatée lors de déplacements en dehors de l'espace parcouru habituel (Figure III.51.b et c), ce qui peut indiquer que ce sont des lieux de passages intéressants même lors des mouvements de migrations.

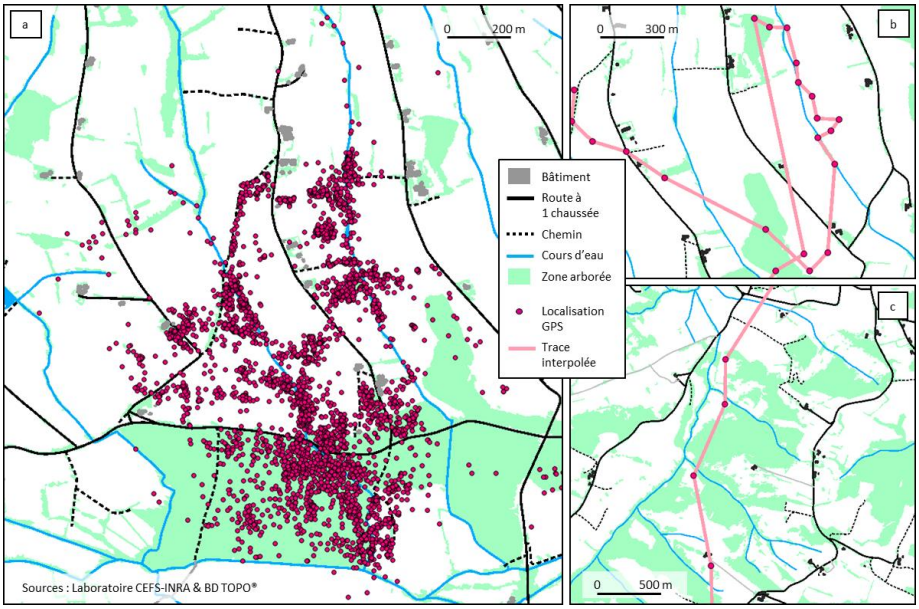


Figure III.51. Influence des zones arborées et des cours d'eau : dans le domaine vital, ces éléments du paysage semblent attirer les chevreuils (a). Lors de déplacements en dehors de l'espace parcouru habituellement, on peut remarquer des localisations successives le long de cours d'eau (b) et dans les zones arborées (c).

- Compensation entre les éléments du paysage évités et les éléments attracteurs :

La présence de zones arborées semble attirer les chevreuils en dépit de la proximité d'éléments du paysage pouvant induire des dérangements. Quelques cas ont été remarqués dans l'échantillon de données. Nous avons extrait en Figure III.52.a des déplacements proches d'une route avec un trafic de moyenne importance mais dans une bordure arborée. En Figure III.52.b, les localisations sont enregistrées pendant 6 heures en moyenne à 50 m d'un bâtiment. Une localisation se situe à 10 m d'un bâtiment mais la présence du chevreuil ne peut y excéder 20 minutes en considérant la fréquence des relevés. Les influences des éléments du paysage qui font obstacle et ceux attracteurs peuvent donc se compenser.

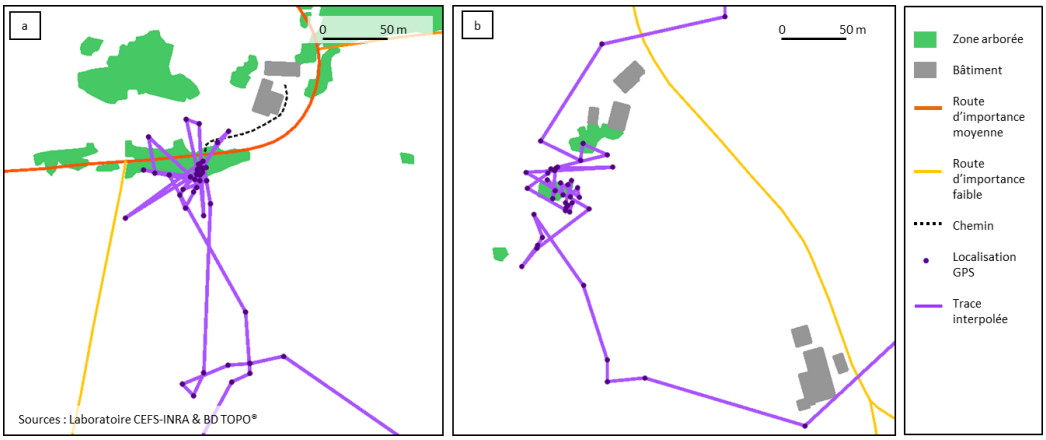


Figure III.52. Utilisation de zones arborées conjointe avec la présence d'éléments du paysage pouvant représenter des dérangements. Suivi d'un chevreuil : a) pendant 6 h à proximité d'une route classée de moyenne importance, b) pendant 8 h à proximité de bâtiments.

- Direction et saisonnalité des déplacements en dehors des domaines vitaux :

Une question sur les déplacements d'excursion en dehors du domaine de vie concerne la direction des chemins empruntés. Les dispersions vers un nouveau domaine de vie sont

logiquement dirigées vers des lieux différents. Concernant la temporalité des dispersions, sur les cinq chevreuils migrant vers un nouveau domaine vital en 2008, trois ont lieu en avril, une en mai et une autre en août. Pour les déplacements de type excursion, il est difficile de donner des conclusions car trop peu de déplacements sur de longues distances sont observés pour un chevreuil à partir d'un même domaine vital : en moyenne deux par an par individu à plus de 1 km de l'espace de vie habituel. Toutes les périodes de l'année sont concernées par ces excursions selon les différents individus, ce qui ne permet pas non plus de conclure sur une saisonnalité particulière de ce type de déplacement. Nous remarquons que deux schémas spatiaux existent et peuvent aussi coexister même pour un individu. Ces deux schémas sont montrés en Figure III.53 pour deux individus différents. Les excursions peuvent avoir lieu dans des directions très différentes (a). Plusieurs déplacements peuvent s'effectuer dans la même direction jusqu'à une destination plus ou moins éloignée des limites du domaine vital (b). Les excursions à une distance inférieure à 1 km sont les plus courantes et s'apparentent à une extension du domaine vital vers des zones d'intérêt comme des cultures ou des zones boisées.

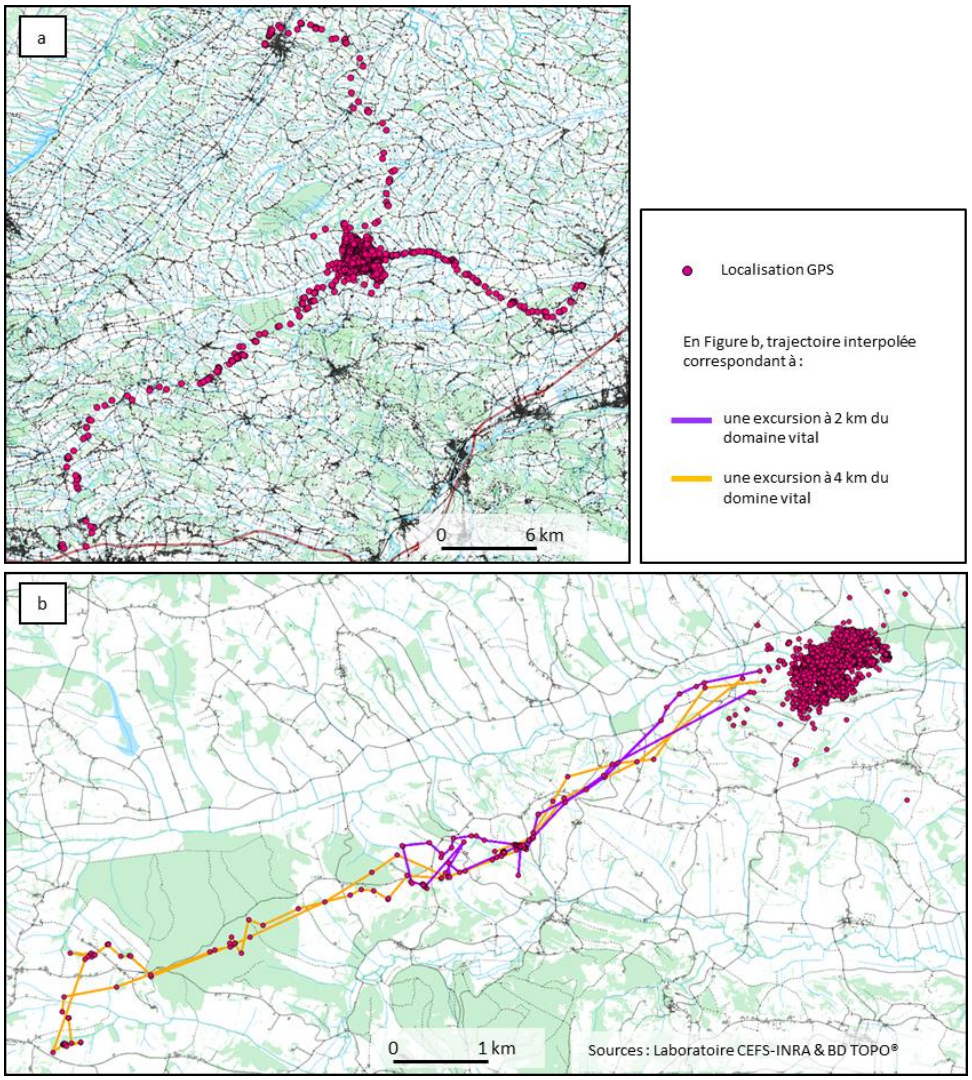


Figure III.53. Les directions des excursions en dehors des domaines de vie pour deux yearlings suivis pendant une année : a) trois excursions dans des directions différentes pendant 2 ou 3 journées chacune ; b) deux excursions pendant chacune environ 4 jours dans une même direction à deux époques de l'année et s'éloignant plus ou moins du domaine vital (2 km et 4 km).

Dans le cas des chevreuils à Aurignac, les rôles de frein ou en faveur des déplacements des éléments du paysage ne sont pas évidents à caractériser car les éléments sont souvent associés. Les cours d'eau sont par exemple souvent associés à de la végétation, ou encore les voies ferrées et les autoroutes se longent. La configuration des cultures et des zones arborées motivent les déplacements, alors que ces mêmes cultures et zones arborées sont délimitées par des routes. Quelques observations peuvent toutefois être résumées. Lors des déplacements à l'intérieur ou bien en dehors du domaine vital, les chevreuils à Aurignac peuvent traverser les routes avec un trafic de faible ou de moyenne importance. Ils peuvent aussi se tenir à proximité de lieux de dérangements humains, comme les bâtiments. Cependant, nous remarquons que les routes influencent la définition des domaines vitaux en restreignant leur emprise et l'intensité de leur utilisation. Les grandes infrastructures de transport comme les autoroutes et les voies ferrées, ont quant à elles, un rôle de frein lors des déplacements de dispersion. Les éléments du paysage qui paraissent être favorables à la présence et aux déplacements des chevreuils sont les zones boisées dont des haies arborées, les cultures et les cours d'eau.

2.4. Enrichissement des interprétations sur les relations entre les éléments du paysage et les déplacements par des sources d'informations complémentaires

Les résultats d'analyse sont soumis à notre interprétation et aux données utilisées. Nous avons souhaité valider nos conclusions par l'apport d'autres sources d'informations. Nous avons d'abord effectué un travail de terrain d'observation des sites d'étude afin de prendre connaissances concrètement des territoires étudiés. Nous souhaitions comparer les informations dont nous disposions avec la réalité terrain. Nous avons ensuite examiné d'autres sources de données pour tenter de compléter la description de l'espace avec des informations jugées pertinentes pour l'interprétation des déplacements. Le travail de terrain et l'étude de bases de données complémentaires ont été réalisés en parallèle des analyses des déplacements présentées précédemment. Nous synthétisons leurs apports dans cette partie. Les chemins empruntés par les individus n'ont pas pu être tous suivis car ils peuvent être longs et couvrir des zones non accessibles. Nous nous sommes plutôt concentrée sur certains lieux particuliers qui présentaient un intérêt pour la compréhension des choix de déplacements.

2.4.1. La mise en perspective des résultats avec un travail de terrain

Le travail de terrain consiste à observer le monde réel. Il sert à visualiser les éléments du paysage présents sur les chemins empruntés par les animaux et à récolter des informations non contenues dans les bases de données existantes. Dans notre étude, nous souhaitons également comparer la description des éléments du paysage dans les bases de données par rapport à leurs caractéristiques observées. Plusieurs problèmes se posent comme l'accès aux sites mentionné précédemment et le décalage de dates. Les dates d'observations sont éloignées jusqu'à dix années par rapport aux suivis. Ce problème de décalage se retrouvait également entre les bases de données géographiques et les relevés de déplacements. Les saisons ne correspondent pas forcément, ce qui peut induire un aspect du paysage très différent. Par exemple sur le site forestier de la RNCFS de La Petite Pierre, la période hivernale est propice à des chutes de neige. Cette saison est associée à une absence de feuillage et à une végétation moins importante au sol que pendant les autres saisons. Les observations sur le terrain ont été effectuées en journée, ce qui confère une fréquentation des lieux et une activité différente de la nuit. Pour les renards en milieu périurbain, les déplacements sur de longues distances ont surtout lieu en période nocturne qui correspond à moins de fréquentation humaine (personnes, véhicules) que la

période diurne. Nous avons pu également observer des changements dans les sites d'étude. Par exemple, des constructions immobilières ont été réalisées sur un des espaces parcouru par les renards autour de Nancy, entre la date des localisations enregistrées et notre observation sur le terrain. Le constat de ces changements rappelle que l'évolution des territoires peut rendre des sites inadaptés ou au contraire appropriés pour une espèce animale, même si nous n'avons pas traité cette question directement dans notre thèse. La gestion des parcelles forestières entraîne des coupes ou encore la délimitation de zones de régénération qui peuvent être clôturées. Nous ne disposons pas du suivi de la gestion de la RNCFS mais il est possible que certaines parcelles aient été modifiées.

Observations sur le site d'étude des renards dans l'agglomération de Nancy

Avec les données géographiques, nous avons une représentation simplifiée des sites habités par les animaux. L'angle de représentation est parallèle à la scène lors des représentations en planimétrie. Un meilleur aperçu est possible par une modélisation en 2D5 ou en 3D des données. La représentation des bâtiments sous forme de parallélépipèdes plus ou moins complétés par des éléments de description comme la toiture, donne du réalisme à la scène. Le parcours des lieux visités par les renards en milieu urbain et périurbain permet de mieux se rendre compte de l'espace tel qu'il est perçu par un individu qui se déplace. Cela permet d'identifier, selon le sens supposé du parcours, les obstacles pouvant dévier les trajets des animaux par rapport à leur destination connue et les endroits pouvant les attirer. Nous avons mis en Figure III.54 la cartographie de la trace d'un renard pendant 24 h et des prises de vues selon le sens de direction estimé.

Les types de paysage urbain traversés sont divers : des zones résidentielles (en Figure III.54, photos n° 1 et 8), un parc (n° 2 et 3), une zone d'activités avec de grands parkings (n° 4 et 5), une zone commerciale (n° 6) et un centre équestre (n° 7). Les bâtiments représentent des obstacles. Ce sont sur le site soit des immeubles soit des pavillons résidentiels avec des jardins. C'est d'ailleurs entre des jardins privés et le centre équestre que le renard suivi a probablement plusieurs gîtes de repos diurnes. De nombreuses routes sont présentes sur le parcours du renard. Le tronçon autoroutier est traversé deux fois à des endroits différents correspondant à des voisinages peu fréquentés surtout en période nocturne : une zone d'activités traversée par une ligne de chemin de fer et un grand parking. Les allées du parc urbain sont goudronnées et dégagées mais peu perturbées la nuit car fermées au public. Le trafic des véhicules nous a semblé correspondre aux informations données par l'attribut sur l'importance des voies dans la BD TOPO®. Avec l'autoroute, les voies autour du parc urbain et autour de la zone commerciale possèdent un trafic routier assez important. Les rues dans la zone résidentielle sont beaucoup moins fréquentées par les véhicules et les personnes.

Figure III.54. La carte des déplacements d'un renard (4) pendant une journée à Vandœuvre-lès-Nancy. Elle est complétée par des photographies de l'espace tel qu'il est vu, en respectant au mieux le sens de déplacement indiqué par les flèches rouges.

En zone périurbaine, certains bas-côtés de routes sont composés d'un trottoir mais aussi d'une bande herbeuse ou d'un fossé en pente. À Nancy, c'est le cas sur le site du campus universitaire parcouru par un des renards. Ces éléments du paysage peuvent représenter des lieux d'intérêt pour les animaux, et dans le cas des fossés aussi des obstacles. Les haies caractérisées par rapport aux autres structures du couvert arboré grâce à l'algorithme décrit en III-2.3.3, ne correspondent pas à des préférences spatiales marquées des renards d'après nos analyses spatiales. Ces haies correspondent à des zones de végétation diverses dans les jardins ainsi qu'à des morceaux de bosquets dans les parcs urbains. Même si les haies extraites sont conformes à la définition souhaitée, elles semblent peu pertinentes en milieu urbain où la végétation arborée est de natures diverses : jardins, friches, taillis dans des parcs, bois. Les haies associées aux clôtures des maisons ne sont pas indiquées dans les données sur la végétation. Il serait intéressant d'étudier l'utilisation des haies lors de suivis de renards en milieu agricole, utilisation a priori préférentielle (Note & Poix, 2006). Dans le cas du renard 2 suivi entre le centre bâti de Saulxures-lès-Nancy, les bois et les champs alentour, la végétation est diverse. Par exemple, les sous-bois peuvent être soit dégagés soit composés de fourrés protégeant ainsi les animaux de la vue à partir des chemins et des routes. Sur le site d'étude d'Annemasse, les observations de terrain ont permis de caractériser une végétation de type ripisylve dense au bord des cours d'eau de l'Arve et du Menoge au sud, et du Foron au nord (photo en II-2.2.2) dans un espace parcouru par un renard. Cette végétation correspond à un lieu inhabité par l'homme et peu dérangé, même si des chemins le rendent accessible.

Parmi les informations qui ne sont pas comprises dans les spécifications du RGE®, certaines peuvent être intéressantes dans l'étude des déplacements. Les éléments qui délimitent et ferment les parcelles sont très nombreux en milieu urbain et ne sont pas saisis dans les bases de données. Plusieurs types existent. Il y a le type de grillages rigides et de maillage fin, correspondant à des ouvrages hauts qui peuvent être enfoncés dans le sol. Ils sont donc a priori assez hermétiques aux traversées par des animaux de la taille d'un renard. Il y a également les murs et les murets qui, par exemple sur le site de Nancy, délimitent une partie des deux parcs urbains parcourus par les renards. Le cimetière à proximité des espaces parcourus par deux renards est aussi entouré par un mur. Ce cimetière n'est pas traversé dans l'échantillon de données mais il est parcouru par un renard suivi dans la thèse de Robardet (2007). Certains jardins de maisons sont séparés par des murets accompagnés parfois de haies végétales ou de clôtures surélevées. Le type des clôtures concerne des ouvrages jusqu'à 1,50 m de hauteur avec des grandes mailles permettant le passage des animaux sauvages. Cela concerne par exemple les clôtures entourant les prairies. Les éléments comme les portails peuvent représenter des barrières aux déplacements mais offrent aussi des lieux de passage. La Figure III.55 montre plusieurs prises de vues d'éléments de fermeture.

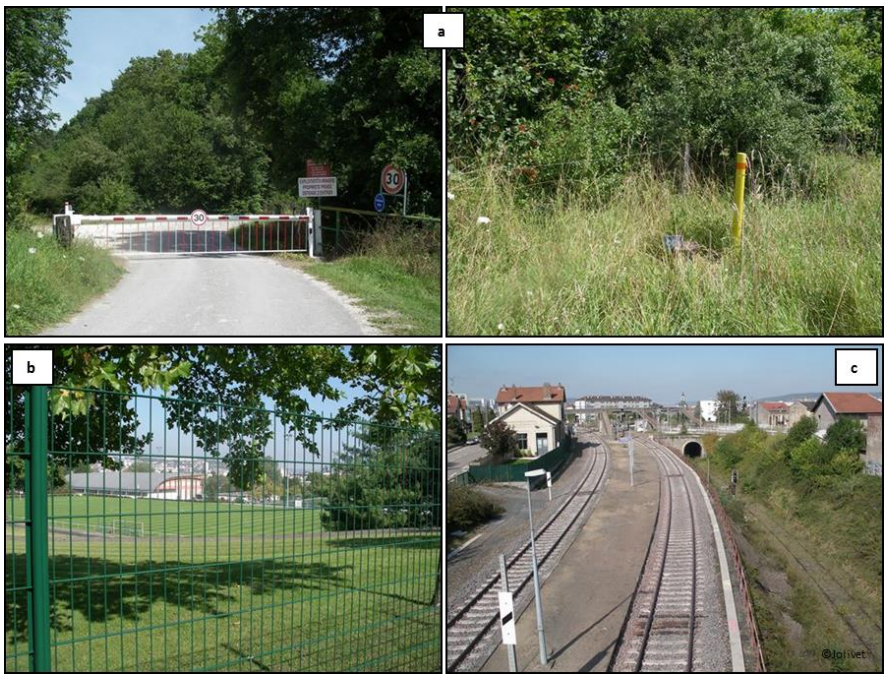


Figure III.55. Différents éléments de barrières : a) clôtures autour d'une exploitation minière interdite au public et où se situe des gîtes de repos d'un renard, b) grillage entourant un terrain de sport, c) voie ferrée entourée de grillages, de murs, de bâtiments et de friches.

Sur les photographies Figure III.55.a, une clôture d'accès est photographiée dans un bois parcouru par un renard, en dehors du centre urbain. Il s'agit d'une clôture entourant un site de sondages salins. L'animal peut traverser sans problème et le site comprend des gîtes de repos diurnes. Cette clôture entraîne une absence de passages par des randonneurs ou des véhicules mais signifie aussi une augmentation possible des dérangements engendrés par l'activité industrielle pendant les périodes d'exploitation. L'information sur la présence de barrières est intéressante car elle est associée à des occupations de l'espace, comme des zones d'exploitation ou des jardins privés qui représentent des dérangements humains particuliers. Le type de barrières est lié au type d'occupation humaine sur un espace. Par exemple, la photo de la Figure III.55.b concerne les grillages autour de terrains de sport. Les localisations GPS des

renards semblent indiquer que celles-ci ne sont pas traversées, laissant supposer que ce type de barrières est davantage hermétique que des clôtures ou des fermetures d'enclos discontinues. La photo de la Figure III.55.c représente une voie ferrée à proximité d'un des renards suivis. Le lieu est isolé du reste de la ville par de larges bas-côtés comprenant des friches ainsi que des grillages, des murs et quelques bâtiments. Sur le site de Pontarlier, une voie ferrée est incluse dans les domaines vitaux de deux renards et elle est associée à des éléments similaires de barrières. Les différents types de fermetures se retrouvent également à Annemasse, notamment dans les lotissements un peu en périphérie de la ville.

Le mobilier urbain est intéressant. Les lampadaires peuvent constituer une source lumineuse influençant les animaux dans leurs déplacements. Les poubelles peuvent attirer certains animaux. Les éléments comme les bancs, les poteaux, les arrêts de bus ne sont pas pris en compte dans les bases de données utilisées : leur importance dans les déplacements est probablement faible au vu de l'emprise de ce mobilier urbain mais ils peuvent être associés à des dérangements. Sur le site d'étude de Pontarlier, des localisations sont enregistrées dans une aire de pique-nique sur laquelle les restes de repas peuvent être intéressants. Cette aire de pique-nique est indiquée sur la carte de randonnée mais pas dans les thèmes de la BD TOPO® que nous avons pris en compte. Concernant des éléments autres que ceux du paysage, un des parcs de loisirs de l'agglomération de Nancy accueille plusieurs espèces d'oiseaux dont des oiseaux d'eau qui peuvent potentiellement attirer les petits carnivores. Les observations sur le terrain nous donnent une vision complète des lieux correspondant aux localisations GPS. Les éléments relevés n'influencent pas tous les déplacements mais ils sont intéressants à prendre en compte dans une description des espaces traversés.

Observations sur le site d'étude des cervidés dans les Vosges

Les chevreuils se déplacent en majorité en dehors des voies d'accès piétonnier dans la RNCFS. Le milieu est fermé avec une végétation arborée plus ou moins dense et l'observation des chemins empruntés par les chevreuils et par les cerfs n'est pas évidente. Les différents types de peuplement forestier ainsi que la forme du relief sont cependant vérifiables entre les données géographiques et la réalité terrain. En Figure III.56, les peuplements forestiers sont cartographiés à partir de la nomenclature de la BD TOPO®.

Les photos n° 1, 2 et 3 correspondent à des vues d'un chemin emprunté par les chevreuils et les cerfs. On observe des feuillus : chênes et hêtres. Le chemin est situé perpendiculairement à la pente. L'accès sur les côtés s'effectue en passant une rupture de pente pouvant atteindre plus de deux mètres. Cependant des lieux moins abrupts facilitent le parcours de la zone. Certaines parcelles correspondent à une majorité de conifères (photo n° 4). Il y a moins de lumière et de végétation au sol (herbacées, arbustes) au sein des peuplements avec de grands arbres. Il y a par contre davantage de lumière dans les peuplements récents avec des arbres encore petits, comme en photo n° 6 classée en « jeune peuplement ou coupe rase ou indicent » dans la Carte Forestière V2. Il peut avoir au bord des chemins, des herbacées, des fougères, des ronces qui sont comestibles par les cervidés. Les routes forestières peuvent aussi être recouvertes par de l'herbe. Une des routes classée comme « empierrée » dans la BD TOPO®, c'est-à-dire non goudronnée mais praticable en voiture, en est un exemple : sur la photo n° 6, il s'agit de la voie située à droite, croisant la route goudronnée « à une chaussée » à gauche.

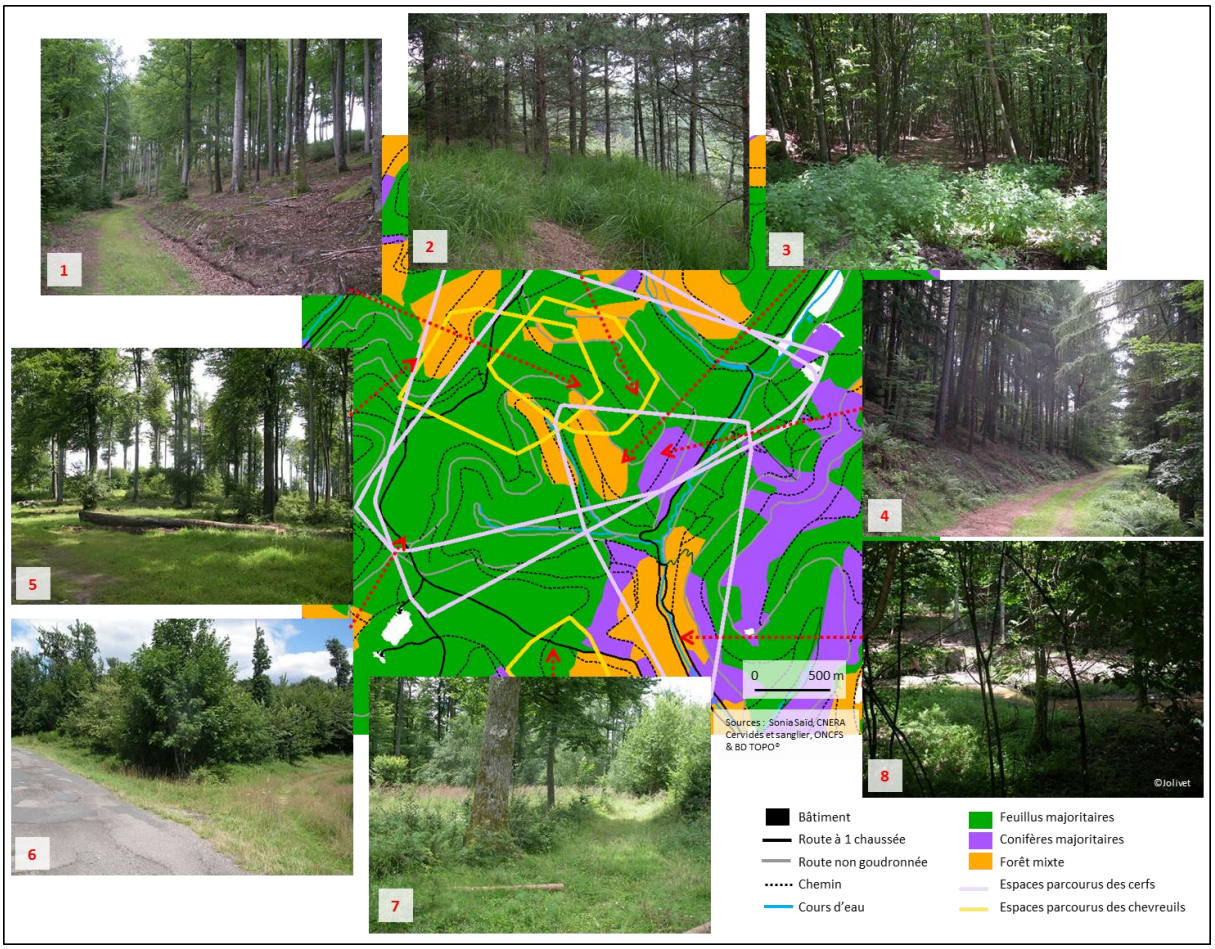


Figure III.56. Les types de formations végétales rencontrés dans les espaces parcourus par les cerfs et les chevreuils dans la RNCFS de La Petite Pierre dans les Vosges.

Des zones dégagées sont fréquentées par les animaux. La photo n° 5 correspond à une zone de coupe et d'exploitation du bois avec quelques grands arbres. La photo n° 7 montre une autre zone avec une faible densité de grands arbres, qui est occupée par l'un des chevreuils. Cette zone longe une route goudronnée. Elle contient des graminées et des herbacées et est entourée par des peuplements de feuillus plus denses. Les voies autour de cette clairière sont aussi recouvertes d'herbe et sont classées comme chemins car elles ne sont pas accessibles en véhicules motorisés. Un des cerfs a un domaine vital centré autour d'un cours d'eau en basse altitude vers 200 m, les autres domaines vitaux étant à environ 350 m d'altitude. La photo n° 8 montre le cours d'eau avec la végétation de type ripisylve. Nous avons vu que les informations sur les peuplements forestiers de la base Carte Forestière permettait de préciser les essences. Une des perspectives du travail pourrait consister à enrichir encore davantage les essences présentes sur le site d'étude – essences arborées et arbustives ainsi que la végétation au sol – afin de préciser les préférences spatiales des cervidés.

2.4.2. Des bases de données complémentaires pour la description des espaces parcourus

La description de l'espace par les données à grande échelle de la BD TOPO® peut être complétée par d'autres sources de données. Ces sources complémentaires sont moins pratiques à utiliser pour l'analyse de l'influence de l'espace sur les déplacements d'animaux. Elles contiennent des informations qui ne sont pas explicitement décrites comme dans le cas des photos aériennes. Nous nous attachons à plusieurs cas où la compréhension des déplacements peut être améliorée

par l'apport des sources complémentaires suivantes : la BD ORTHO®, la BD PARCELLAIRE® et la base du Registre Parcellaire Graphique (RPG). Les observations de terrain nous ont d'abord permis d'améliorer cette compréhension en certains lieux. Nous regardons à présent ce qu'il est possible de détecter directement à partir d'une interprétation visuelle des sources de données.

Les photographies aériennes

Les photographies aériennes ont l'avantage de couvrir exhaustivement une zone, en dehors des problèmes de cache et des déformations dues aux limites techniques des prises de vues. Cet aspect nous a paru particulièrement intéressant afin de préciser la caractérisation du site d'étude en milieu forestier de La Petite Pierre. La nomenclature de la base Carte Forestière concerne la composition en essences principales. Cependant, toutes les classes ne renseignent pas sur l'âge du peuplement, le taux de couverture arborée et les différentes essences. Par exemple, la classe « jeune peuplement ou coupe rase ou incident » ne contient pas d'information sur la composition. Les classes de peuplements plus anciens, comme « hêtre pur » ou « chênes décidus purs », ne sont pas renseignées sur le taux de couverture même si les spécifications indiquent que celui-ci est supérieur à 40 % (IGN, 2012). La Figure III.57 montre la photographie aérienne de la BD ORTHO® à côté de la base Carte Forestière V2 sur une partie parcourue par un chevreuil. La clairière est bien reconnaissable sur les deux sources de données. Les voies d'accès le sont également même si l'on ne distingue pas leur recouvrement. Les distinctions entre les types de peuplements forestiers principaux sont visibles, par exemple entre la hêtraie et le mélange de feuillus. Cette dernière classe peut par contre être détaillée par la BD ORTHO®. On peut reformuler ici les conclusions tirées des observations de terrain : la parcelle de mélange de feuillus est composée de zones plus ouvertes proches de la route, puis de jeunes arbres et de grands arbres notamment au sud de la clairière. La zone plus ouverte est d'ailleurs la plus exploitée pendant la journée de suivi du chevreuil concerné. Pour les autres journées de suivis, les lieux occupés sont situés dans cette même zone dégagée entre la route et le chemin perpendiculaire, ainsi que dans une partie couverte par la classe « conifères prépondérants et feuillus ».

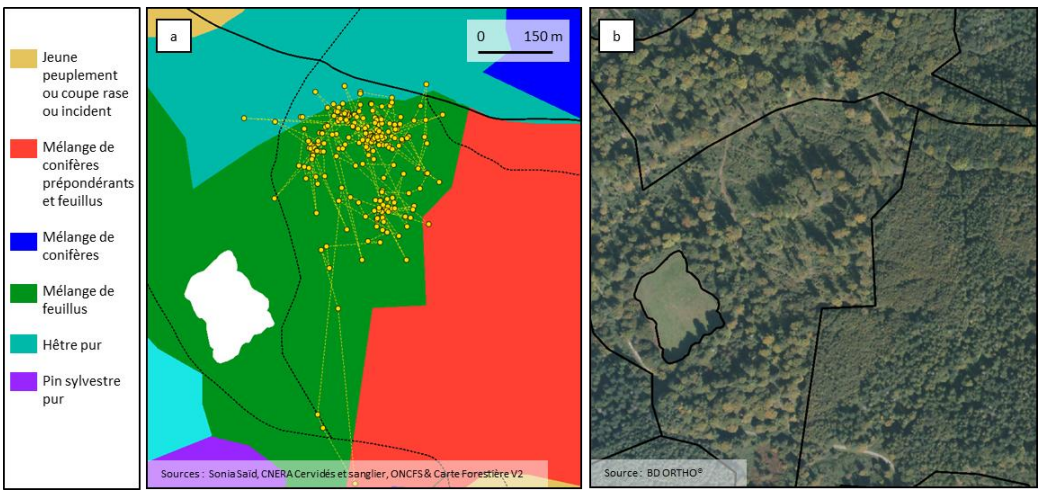


Figure III.57. Les localisations et la trace interpolée d'un chevreuil suivi pendant 24 heures dans la RNCFS. Mise en parallèle de la Carte Forestière V2 et de la BD ORTHO®.

Nous avons testé le lancement d'une classification supervisée par la méthode de maximum de vraisemblance à partir des images aériennes. Nous sommes partis de l'extrait de la Figure III.57 et nous avons défini six classes à partir de la structure de la végétation. Une des classes correspondait à la clairière et aux voies non recouvertes par les arbres. La définition des autres

classes s'appuyait sur les textures différentes apparaissant distinctement à l'image. Sur cet échantillon, les résultats étaient peu concluants car la distinction entre les classes obtenues est moins intéressante que celle entre les classes de la Carte Forestière. En effet, les classes résultantes sont trop morcelées pour donner une cartographie exploitable. Nous n'avons pas poussé plus loin ce test et une perspective pourrait consister à lancer de nouvelles classifications à partir d'images aériennes et satellites.

Les informations issues des limites des propriétés

Les informations qui nous semblaient pertinentes concernant le mobilier urbain et les barrières apparaissent sur les images aériennes. L'extraction automatique d'objets à partir des images ne fait pas partie de nos objectifs. Cependant, nous avons vérifié si les éléments qui nous intéressent visibles sur le terrain, le sont aussi à partir des images aériennes. La Figure III.58 se concentre sur un des espaces parcourus par un renard à Nancy. La BD TOPO®, la BD ORTHO® et la BD PARCELLAIRE® y sont représentées.

Figure III.58. Différentes sources de données pour identifier l'emplacement des éléments de barrières. a) Les localisations d'un renard pendant une nuit sont cartographiées en superposition de la végétation, des routes et des bâtiments de la BD TOPO® (en transparence) et de la BD ORTHO®. b) La BD PARCELLAIRE® représente les limites de propriétés qui correspondent à certaines barrières.

La visualisation des grillages et des clôtures n'est pas évidente à partir des images aériennes. Elles ne peuvent pas être vectorisées directement à partir de celles-ci sans observations préalables sur le terrain. Sur les zooms de la Figure III.58, les barrières autour des maisons sont cachées par la végétation. Le grillage longeant la route est top fin pour se distinguer du fond. Lorsque l'on affiche la BD PARCELLAIRE®, certaines des barrières se superposent avec les limites de propriétés. Cette correspondance peut aider à une vectorisation validée par le terrain.

Les données sur l'occupation du sol

Une autre source de données nous a semblé particulièrement pertinente en complémentarité avec le RGE®. Il s'agit du Référentiel Parcellaire Graphique (RPG) qui décrit les parcelles culturales. L'intérêt de cette base est qu'elle couvre des occupations du sol absentes de la BD TOPO®, avec une mise à jour annuelle. Le RPG est visualisable mais non téléchargeable à partir du site du GéoPortail. Nous utilisons la base de 2007, la plus proche des dates de suivis des renards à Nancy. Ces informations nous permettent de caractériser les zones exploitées par l'agriculture et de connaître le type de culture ou d'occupation du sol. Les champs cultivés ou non sont connus pour être des lieux occupés par les trois espèces étudiées. Ils peuvent contenir directement des ressources (micromammifères pour le renard, certaines essences dans les cultures et les prairies pour le chevreuil et le cerf). Ce sont aussi des lieux de passage. Les cas d'étude incluant des zones agricoles correspondent à ceux des renards et à celui des chevreuils en Haute-Garonne. Les renards suivis à Pontarlier ont des domaines vitaux situés à l'extérieur du tissu urbain dense, constitués en partie de forêts et de parcelles exploitées recensées dans le RPG. Il s'agit surtout de prairies permanentes comme pour la plupart des parcelles cartographiées autour de Pontarlier (Figure III.59). Quelques prairies temporaires et de cultures fourragères sont présentes. Dans le cas d'étude d'Annemasse, six des huit renards occupent des zones de cultures. Ce sont là aussi principalement des prairies permanentes et temporaires, ainsi que des cultures de maïs et de blé. Pour les renards suivis dans l'agglomération de Nancy, un seul est concerné par des zones de cultures, précisément : prairies, champs d'orge, de maïs, de blé.

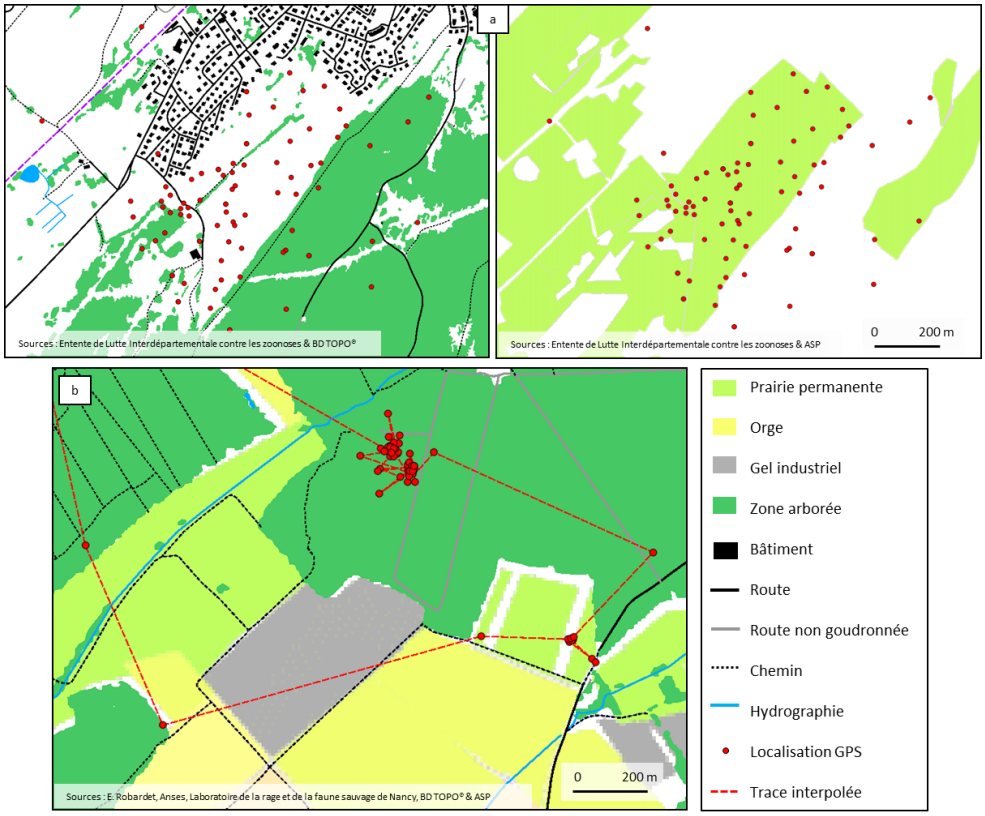


Figure III.59. Localisations GPS superposées à la description de l'espace par les bases BD TOPO® et RPG : a) pour un renard suivi pendant 6 mois au sud de Pontarlier, b) superposition des deux sources de données pour un renard à l'est de Nancy suivi de minuit (exploitation de la prairie pendant la nuit) au soir suivant (dans la forêt pendant la journée).

Pour les chevreuils dans le canton d'Aurignac, le RPG permet de décrire les lieux occupés par les individus en dehors des zones arborées. Nous disposons de l'information concernant la distance d'un individu par rapport à une zone arborée afin de qualifier une proximité ou un éloignement. Les champs ne sont pas exploités de manière identique par les différents chevreuils. Nous ne faisons pas de calculs statistiques car nous ne pouvons que visualiser les données sur les parcelles agricoles. Cependant nous remarquons par exemple, dans le suivi de l'année 2008, une occupation par les chevreuils des parcelles agricoles correspondant principalement à des prairies permanentes et temporaires, et secondairement à des cultures céréalières (blé, orge, maïs). Par rapport à la base CORINE Land Cover, la précision est plus grande concernant le type de prairies et de cultures. Les emprises surfaciques sont aussi plus précises dans le RPG et se superposent dans une moindre mesure avec les données sur les petites zones arborées. Pour les renards, nous pouvons faire la même remarque : la distinction entre prairies et cultures reste intéressante à partir des deux bases de données.

Les informations issues des sources de données complémentaires sont utiles pour l'interprétation de la présence des animaux et de leurs déplacements. Elles servent à préciser certaines occupations du sol. Elles peuvent aider à extraire des objets observés sur le terrain comme les limites de parcelles matérialisées par des barrières freinant potentiellement les déplacements. L'ensemble des sites de nos cas d'étude est couvert par les bases de données. Les données de description de l'espace permettent de compléter les observations de terrain qui sont encadrées par des restrictions d'accès : par exemple la circulation dans la RNCFS de La Petite Pierre doit s'effectuer sur les chemins et les routes, et de manière générale les propriétés individuelles ou d'exploitation industrielle ne sont pas accessibles. Il peut y avoir des problèmes d'occultation des éléments sur les images et surtout l'extraction automatique d'informations n'est pas évidente à mettre en œuvre.

2.5. Validation par une approche statistique des résultats obtenus sur les relations paysage/déplacements

Nous avons effectué dans la partie III-2 des analyses descriptives des déplacements des animaux par rapport à leur environnement spatial (caractérisation de la proximité ou de l'éloignement aux éléments du paysage, présence ou absence sur certaines occupations du sol). Ces résultats d'analyse ont été comparés à une description de l'environnement spatial large dans lequel se situent les animaux afin d'identifier des préférences spatiales ou des évitements vis-à-vis des éléments du paysage. Nous souhaitons confirmer statistiquement nos précédents résultats. Nous reprenons pour cela les caractères de l'espace qui semblent jouer un rôle sur le déplacement des animaux. Nous commençons par décrire notre approche de manière générique dans la partie III-2.5.1. Nous l'appliquons aux différents cas d'étude. Nous présentons en III-2.5.2 les résultats pour le cas d'étude des chevreuils et cerfs dans les Vosges, et en III-2.5.3, les résultats obtenus sur les renards suivis dans l'agglomération de Nancy. Nous n'avons pas réalisé de tests statistiques pour les chevreuils à Aurignac ni pour les renards à Annemasse et à Pontarlier, ce qui représente une perspective de poursuite de nos travaux après la thèse.

2.5.1. Proposition de l'approche statistique

La validation statistique de préférences spatiales ou d'évitement des éléments du paysage passe par une comparaison entre les caractères de l'espace proche des animaux et ceux de l'espace éloigné de ces mêmes animaux. Les comparaisons entre espace parcouru et espace non

parcouru doivent s'appuyer sur des entités spatiales identiques. Nous avons donc créé une grille régulière qui correspond à un découpage unique de chaque site d'étude, comme dans Buard (2013). Les individus statistiques considérés sont les cellules (appelés aussi pixels ou quadrats) de cette grille unique. Les variables testées statistiquement concernent les éléments du paysage présents à l'intérieur des cellules. La construction de la grille correspond aux critères suivants :

- le pas est régulier en longitude et en latitude et il est égal à 25 m. Cette valeur correspond au pas du MNT du RGE®ALTI et les contours des cellules se superposent à ceux des pixels du MNT ;
- l'emprise totale de la grille correspond à notre définition des sites d'étude. Il s'agit du rectangle englobant éloigné de 1 km de l'ensemble des localisations des animaux inclus dans le cas d'étude.

La grille est superposée aux données géographiques, comme illustré en Figure III.60. Pour chaque type d'élément du paysage, la surface intersectée par les cellules est calculée. Les éléments du paysage sélectionnés pour caractériser les cellules dépendent du site d'étude et des résultats d'analyse précédents sur les déplacements. Nous les présenterons par cas d'étude.

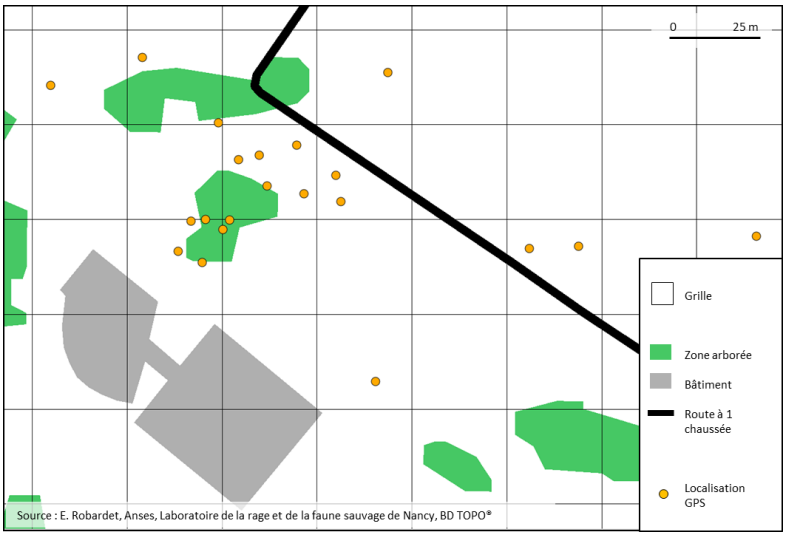


Figure III.60. La grille d'un pas de 25 m superposée aux données géographiques des zones arborées, des bâtiments et des voies de communication et aux localisations d'un renard suivi à Nancy. Dans cet exemple, les cellules contiennent entre 0 et 5 localisations.

Nous modélisons tous les objets géographiques par des surfaces, ce qui nécessite de représenter les objets linéaires comme les routes ou les voies ferrées par des zones tampon d'un rayon cohérent. Ce rayon change selon les objets linéaires, en relation avec leur largeur moyenne, comme indiqué dans le Tableau III.12. Pour certaines voies de communication, la largeur est indiquée BD TOPO®. Cependant, comme l'information n'est pas remplie pour chaque objet, nous avons préféré associer des largeurs identiques par type de voie. Nous avons considéré que la valeur moyenne d'une chaussée de route à double sens étant généralement de 3,5 m, le rayon du buffer est égal à 1,75 m. Cette valeur concerne les routes à 1 chaussée, les routes non goudronnées (nommées 'empierrées' dans la nomenclature) et les bretelles d'autoroutes. La largeur des autoroutes est fixée à 14 m. Les chemins, les escaliers et les pistes cyclables sont associés à une largeur de 2 m et les sentiers généralement plus étroits ne permettant pas le passage d'un véhicule à une largeur de 1 m. Pour les voies ferrées, nous avons considéré un rayon plus large de 40 m qui permet ainsi d'inclure l'espace non construit autour des voies pouvant comprendre des aménagements comme des grillages ou de la végétation. Les cours

d'eau sont associés à une largeur moyenne de 4 m. Les valeurs d'altitude et de pente sont extraites du MNT pour chaque cellule de 25 m de côté.

Tableau III.12. Les valeurs des rayons des zones tampon autour des objets géographiques linéaires considérés pour tester statistiquement les relations paysage/déplacements. La largeur considérée est le double du rayon.

Élément du paysage	chemin	escalier	piste cyclable	route à 1 chaussée	route à 2 chaussées	route non goudronnée	sentier	bretelle	autoroute	voie ferrée	cours d'eau
Rayon du buffer (m)	1	1	1	1,75	3,5	1,75	0,5	1,75	7	20	2

Sur les individus statistiques créés, nous menons plusieurs tests dans l'objectif de confirmer ou de modérer les résultats obtenus précédemment.

- Caractérisation d'un évitement ou d'une présence préférentielle près ou à l'intérieur de certains éléments du paysage

Pour confirmer ces évitements ou ces préférences, nous comparons les caractères de l'espace (les éléments du paysage) entre les cellules contenant des localisations enregistrées d'animaux et les cellules de la zone englobante. Nous utilisons le test statistique de Mann-Whitney qui permet de déterminer si un caractère de l'espace est significativement plus abondant dans les cellules parcourues par les animaux que dans les autres. Ce test ne nécessite pas que la distribution des valeurs de la variable soit normale. Il est réalisé sur les surfaces des éléments du paysage contenues dans les cellules ou bien sur les valeurs d'altitude et de pente, ceci par espèce si deux espèces sont suivies sur un même site.

- Niveaux de présence des animaux et des éléments du paysage

Nous souhaitons distinguer les niveaux de présence des animaux, si les animaux ont tendance à rester près d'un même endroit – ils s'y déplacent sur de petites distances et ils y restent longtemps – ou s'ils se déplacent plutôt rapidement. Ces types de déplacements peuvent être associés au nombre de localisations présentes dans une cellule. Plus il y a de localisations dans une cellule, plus les individus y restent pour se reposer ou exploiter une ressource. S'il n'y a qu'une seule ou un faible nombre de localisations dans une cellule, cela signifie que les individus ont tendance à y rester peu et qu'ils sont présents juste pour aller d'un point à un autre. Nous souhaitons également distinguer les différences entre la présence des éléments du paysage par cellule : présence plus ou moins importante correspondant à une superficie plus ou moins élevée dans la cellule. Pour les altitudes et pentes, différentes classes de valeurs peuvent être définies. La distinction entre les types de déplacements et les répartitions des caractères de l'espace est traduite par des classes de valeurs sur le nombre de localisations et les superficies des éléments du paysage. Nous utilisons le test statistique du Khi² afin de définir la significativité des relations entre les classes de niveaux de déplacements et les classes de répartitions des éléments du paysage.

- Différence de comportement entre les espèces animales

Cette interrogation concerne le cas des chevreuils et des cerfs sur le même site des Vosges. Nous cherchons à déterminer si les préférences spatiales ou les évitements constatés pour les deux espèces peuvent être précisés par le test statistique précédent. Il s'agit d'identifier si les comportements sont plus marqués pour une espèce par rapport à l'autre. Pour cela, nous effectuons également le test de Mann-Whitney qui compare les valeurs ou les superficies d'un caractère de l'espace entre les cellules contenant des localisations de chevreuils et celles

contenant des localisations de cerfs. Le test détermine si la différence entre les deux espèces est significative.

- Synthèse des caractères de l'espace correspondant à la présence des animaux

Nous avons principalement mené des analyses par type d'éléments du paysage, ce qui donne peu d'informations directes sur les répartitions entre ces éléments du paysage. Nous souhaitons résumer les caractères de l'espace (répartition des éléments du paysage, caractérisation du relief) par rapport aux localisations des animaux. Nous caractérisons alors les localisations des animaux selon des distances aux éléments du paysage et selon leur présence dans le relief, puis nous appliquons une analyse en composante principale. Cette analyse factorielle permet d'identifier les caractères de l'espace associé aux localisations. Nous l'appliquons sur le cas des renards à Nancy afin de vérifier le rôle du taux d'urbanisation.

Les tests statistiques sont réalisés par individu ou par espèce selon les cas d'étude. Les résultats sont présentés avec leur significativité déduite de la valeur p. La valeur p est la probabilité de rejeter l'hypothèse nulle qui correspond à l'absence de relation entre les variables testées. La significativité de la relation augmente lorsque la valeur p diminue. Nous définissons plusieurs degrés de significativité inspiré de la table de R. A. Fisher dans Minvielle & Souiah (2003) :

- Une valeur p inférieure à 0,001. Cela signifie que la relation est hautement significative et qu'il y a une probabilité inférieure à 0,01 % de rejeter l'hypothèse nulle ;
- Une valeur p comprise entre 0,001 et 0,01. La relation est très significative et la probabilité de rejeter l'hypothèse nulle est entre 0,1 % et 1 % ;
- Une valeur p comprise entre 0,01 et 0,05. La relation est significative et la probabilité de rejeter l'hypothèse nulle se situe entre 1 % et 5 % ;
- Une valeur p supérieure à 0,05 est trop élevée pour affirmer une relation entre les variables testées.

Une interprétation est formulée en rapport avec les résultats des analyses spatiales précédentes et les comportements connus des espèces animales décrits dans la littérature.

2.5.2. Les relations entre les éléments du paysage et les déplacements des individus de cervidés en milieu forestier

Nous caractérisons les cellules de la grille créée avec un pas de 25 m x 25 m, sur le site d'étude des Vosges situé en milieu forestier, par les caractères de l'espace suivants :

- le relief : la valeur de l'altitude ou de la pente de la cellule, qui correspond à la valeur du pixel du MNT et des pentes calculées à partir du MNT ;
- l'hydrographie : les cours d'eau et les plans d'eau ;
- la végétation : nous distinguons les types d'essences forestières selon la nomenclature de la BD TOPO®, puis selon la nomenclature plus précise de la base Carte Forestière (version 2). Nous avons en effet constaté grâce aux analyses descriptives des localisations que les chevreuils et les cerfs semblent avoir des préférences de présence dans certains peuplements forestiers ;
- les voies de communication selon leur type : sentier, chemin, route non goudronnée (ou empierrée), route à une chaussée ;
- les bâtiments.

Le nombre de localisations d'animaux incluses dans les cellules est ensuite calculé. Nous avons lancé les tests statistiques sur les comportements spatiaux par espèce. Cela signifie que nous

avons réuni l'ensemble des localisations des trois individus de chevreuils, puis des trois individus de cerfs, comme nous l'avions fait lors des analyses descriptives.

L'espace parcouru par les chevreuils

Le Tableau III.13 synthétise les résultats pour les chevreuils par élément du paysage : le test pour identifier l'évitement ou la préférence par élément du paysage (Mann-Whitney) puis le test pour distinguer les types de déplacements et les types d'occupation de l'espace par l'élément du paysage (Khi²). Le second test n'est mené que si le premier test est significatif et s'il y a suffisamment de localisations pour définir des classes de nombres de localisations et des classes de surfaces de cellule couverte par l'élément du paysage. Pour réaliser le test du Khi², le nombre des effectifs doit être supérieur à 5. Sinon, nous indiquons dans le tableau « non réalisé ». Les classes de nombre de localisations sont définies en fonction de la distribution du nombre de cellules de la grille concernées. Nous avons conservé pour les tests les classes suivantes : aucune localisation, 1, entre 2 et 4, entre 5 et 10 et plus de 11. Les classes avec beaucoup de localisations sont fusionnées si les cellules concernées ne sont pas assez nombreuses. Pour les classes de surfaces de l'élément du paysage, nous avons défini 4 classes : aucune intersection avec la cellule, faible surface, surface moyenne, surface importante (pour les objets linéaires comme les routes ou surfaciques comme les bâtiments) ou totalité de la surface (pour les essences forestières) de la cellule couverte. Pour les pentes, nous avons définis 5 classes d'intervalle de 5° jusqu'à 25°, puis 1 classe pour les pentes supérieures à cette valeur. Nous avons indiqué dans le Tableau III.13, la significativité pour les deux tests et le comportement spatial auquel il correspond pour les chevreuils.

Le relief semble bien jouer un rôle dans les déplacements des chevreuils, comme vu en III-2.1.1. Les tests statistiques confirment cette hypothèse. Les chevreuils se situent de manière très significative à des altitudes élevées et sur des pentes faibles. Les deux variables peuvent être liées car les domaines vitaux définis par les chevreuils correspondent à des surfaces de petite taille (autour de 0,5 km²) ; donc si ceux-ci sont situés à des altitudes élevées, les chevreuils y restent. D'après le test du Khi², la préférence des chevreuils pour les pentes faibles dépend de leur comportement en termes de mobilité : les pentes très faibles (inférieures à 5°) sont préférées pour les comportements de faible mobilité, alors que des pentes un peu plus fortes (entre 5° et 10°) conviennent pour des comportements de plus forte mobilité. Leur répulsion pour les pentes fortes (supérieures à 20°) est marquée dès que leur mobilité ralentit (plus de 2 localisations par cellule). Nous formulons l'hypothèse que les pentes fortes ne constituent pas un obstacle impraticable pour les chevreuils mais qu'elles ne sont pas exploitées (ressources alimentaires ou repos).
Concernant l'hydrographie, les chevreuils s'en tiennent éloignés de manière significative. Ils sont absents des cellules avec des plans d'eau et sont peu situés sur celles avec des cours d'eau. Nous pouvons relier cela au relief, car les chevreuils se situent davantage sur des plateaux avec peu de cours d'eau.

Tableau III.13. Les résultats des tests statistiques pour les chevreuils concernant leurs évitements et leurs préférences spatiales, ainsi que les types de déplacement et de couverture de l'élément du paysage.

Caractère de l'espace	Comparaison entre les cellules avec 1 ou plusieurs localisations et les cellules sans localisation (Test de Mann-Whitney)		Distinction entre les types de déplacements et l'occupation des éléments de l'espace (Test du Khi²)	
	Significativité	Description du comportement significatif	Significativité	Description du comportement significatif
Altitude	***	préférence pour les altitudes élevées	non réalisé	
Pente	***	préférence pour les pentes faibles	***	stations sur pente faible et déplacements rapides sur pente forte
Cours d'eau	***	évitement	non réalisé	
Plan d'eau	**	évitement	non réalisé	
Conifères	***	évitement	non réalisé	très peu présent
Feuillus	***	préférence	***	stations et déplacements rapides
Peuplements mixtes	*	préférence	***	déplacements rapides
(CFv2) Jeune peuplement ou coupe rase ou indicent : JCI	***	préférence	***	stations
(CFv2) Chênes décidus purs	***	préférence	***	stations et déplacements rapides
(CFv2) Hêtres purs	***	évitement	***	stations en lisière et déplacements rapides
(CFv2) Mélange de conifères	***	évitement	NS	
(CFv2) Mélange de feuillus prépondérants et conifères	NS			
(CFv2) Mélange de conifères prépondérants et feuillus	NS			
Chemin	**	évitement	***	déplacements rapides
Route à une chaussée	NS			
Route non goudronnée	NS			
Sentier	***	évitement	non réalisé	
Bâtiment	*	évitement	non réalisé	

*** significatif à 0,1 %	** significatif à 1 %	* significatif à 5 %	NS non significatif

Les chevreuils ont des préférences significatives en termes d'essences forestières selon la nomenclature de la BD TOPO® – conifères, feuillus et essences mixtes. Les chevreuils évitent nettement les conifères et préfèrent les feuillus, alors qu'ils préfèrent les essences mixtes de manière moins significative. Ces conclusions correspondent aux résultats obtenus par les analyses descriptives en III-2.1.2. Lorsque l'on détaille les types de déplacements et de surfaces, les préférences sont très significatives. Les quadrats recouverts principalement de feuillus contribuent au Khi², ceci quel que soit le nombre de localisations. Cela signifie que les chevreuils stationnent dans les feuillus et s'y déplacent rapidement également. Pour les peuplements mixtes, le test est un peu moins significatif que pour les feuillus. Les localisations sont particulièrement peu nombreuses dans ces cellules, ce qui correspond plutôt à des déplacements rapides. Lorsqu'il y a plus de 5 localisations de chevreuils, les peuplements mixtes sont sous-représentés dans les cellules. Ils seraient donc assez favorables aux déplacements des chevreuils (une localisation par cellule), mais seraient évités pour un comportement moins mobile.

La base Carte Forestière V2 apporte des précisions supplémentaires quant aux compositions en essences forestières des cellules parcourues ou non par les chevreuils. Nous avions vu en III-2..2 que certains peuplements semblaient surreprésentés ou sous-représentés dans les zones de déplacements des chevreuils par rapport à leur présence dans le site d'étude. Nous nous y intéressons en particulier. Les jeunes peuplements ou coupes rases ou incidents (JCI) peuvent correspondre à un milieu ouvert. Ils peuvent être couverts par de jeunes pousses d'arbres et des essences semi-ligneuses (ronce, myrtillier) prisées par les chevreuils (ONCFS, 2007). Les chevreuils sont significativement observés dans les JCI d'après le test de Mann-Whitney. La distinction par classe de localisations et de surfaces permet de préciser que cette préférence correspond à un comportement peu mobile donc d'exploitation des JCI, probablement lors des phases de recherche fourragère. Ce comportement peu mobile est significatif au cœur des JCI et à la lisère avec d'autres peuplements correspondant à d'autres ressources alimentaires (feuillus) ou à des zones de refuges (feuillus, conifères). Pour les chênaies décidues pures, la préférence est significative quel que soit le nombre de localisations et la surface couverte (lisière ou non). Les chevreuils semblent exploiter les chênaies avec une mobilité faible et élevée. Ils y stationnent probablement à cause de leur intérêt pour cette ressource alimentaire (Saïd *et al.*, 2005). Ils s'y déplacent aussi rapidement, indiquant une occupation pendant de longues durées de ce type de peuplement. Les hêtres représentent une ressource alimentaire généralement par défaut pour les chevreuils. Nous constatons que les chevreuils évitent significativement cette essence. L'évitement est particulièrement significatif pour un comportement peu mobile et au cœur des hêtraies. Les chevreuils peuvent donc se déplacer en lisère des hêtraies mais ne les exploitent que très peu. Les analyses descriptives semblaient indiquer une sous-exploitation des mélanges de conifères et une légère exploitation des mélanges conifères/feuillus. Seul l'évitement des mélanges de conifères est significatif, mais nous ne pouvons distinguer l'intensité de la mobilité des chevreuils.
Les chevreuils ne semblaient pas être gênés par la proximité des voies de communication (23 % des localisations à moins de 20 m de voies), comme illustré en Figure III.61.

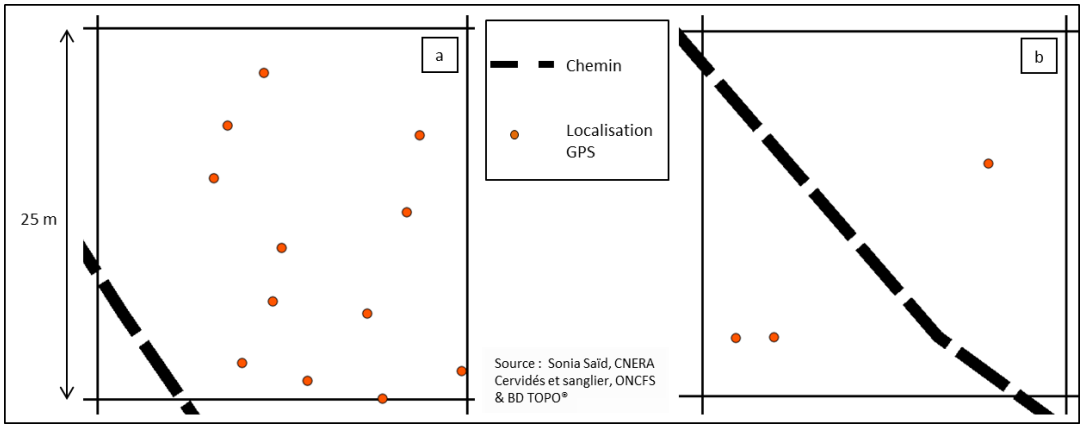


Figure III.61. Exemple de deux individus statistiques caractérisés par la surface des chemins : a) une cellule avec 12 localisations et une petite portion de chemin, b) une cellule contenant 3 localisations et traversée en diagonale par un chemin.

D'après le test de Mann-Whitney, il apparaît en fait que les chevreuils évitent plutôt les chemins ainsi que les sentiers, selon le pas de la grille de 25 m. Le test du Khi² indique que les chevreuils sont plus souvent situés qu'attendu dans les pixels sans aucun chemin. S'il y a une petite portion de chemin dans la cellule, cela signifie qu'il reste potentiellement une grande surface sans chemin et que la distance d'éloignement peut aller jusqu'à 35 m (diagonale de la cellule, Figure III.61.a). Dans ce cas, les chevreuils ont tendance à se déplacer rapidement (1 localisation

par cellule) mais n'y restent pas (sous-représentation des cellules contenant plusieurs localisations). Si les chemins occupent une grande portion de la cellule, c'est-à-dire qu'ils la traversent en diagonale (Figure III.61.b), les chevreuils s'y déplacent peu et y stationnent encore moins. Pour les routes forestières goudronnées ou non, les relations ne sont pas significatives. Les chevreuils ne semblent ni utiliser de manière préférentielle ces voies ou leur voisinage, ni s'en tenir éloignés.
L'évitement des bâtiments est faiblement significatif. En effet le site d'étude situé en milieu forestier en contient peu.

L'espace parcouru par les cerfs

Les tests de Mann-Whitney et du Khi² ont été réalisés pour les cerfs sur les mêmes variables spatiales que pour les chevreuils et ils sont mis en perspective avec les analyses descriptives. Les résultats sont présentés dans le Tableau III.14 selon leur significativité.

Les cerfs parcourent des zones situées à des altitudes plus élevées (en moyenne 305 m) que dans le reste du site d'étude (295 m). Nous avions vu en III-2.1.1 que les cerfs sont rencontrés à des altitudes variables pouvant correspondre à des fonds de talwegs et à des plateaux, mais cette observation ne se vérifie pas statistiquement. Les cerfs préfèrent les pentes faibles, même si la relation est moins significative que pour les chevreuils. Lorsque l'on détaille les classes des valeurs de pentes et les classes des nombres de localisations, on remarque que la plus forte contribution à la valeur du Khi² est liée à la surreprésentation des localisations sur les pentes faibles entre 5° et 10°. Les pentes moyennes et fortes entre 10 et 20°, sont liées à la sous-représentation des cerfs dans les cellules représentant 20 % du Khi². Contrairement aux chevreuils, le parcours des pentes ne semble pas lié à des déplacements rapides. Cela vient du fait que les cerfs sont plus mobiles. Ils restent moins sur une même cellule et les localisations sont moins regroupées que pour les chevreuils.
Les cerfs sont présents dans les talwegs qui correspondent sur le site à des cours d'eau. La préférence de proximité à des cours d'eau est significative par le test de Mann-Whitney. Le test du Khi² montre que lorsque la surface du cours d'eau est importante dans la cellule, les cerfs s'y déplacent rapidement (1 localisation par cellule). Lorsque les cours d'eau sont un peu éloignés (portion faible de la cellule couverte), les cerfs y stationnent et s'y déplacent, même si la relation est moins significative que pour les cours d'eau proches. Les cerfs sont absents des cellules avec des plans d'eau, peu présents dans les espaces parcourus. Nous avions mentionné dans le chapitre II que la présence d'eau est nécessaire sur le domaine de vie des cerfs pour les souilles. Les plans d'eau et les cours d'eau contenus dans la BD TOPO® sont certainement trop importants pour correspondre à ceux utilisés par les cerfs.

Tableau III.14. Les résultats des tests statistiques pour les cerfs concernant leurs évitements et leurs préférences spatiales, ainsi que les types de déplacement et de couverture de l'élément du paysage. La significativité des résultats est indiquée en fonction de la probabilité d'erreur sur l'existence de la relation.

Caractère de l'espace	Comparaison entre les cellules avec 1 ou plusieurs localisations et les cellules sans localisation (Test de Mann-Whitney)		Distinction entre les types de déplacements et l'occupation des éléments de l'espace (Test du Khi²)	
	Significativité	Description du comportement significatif	Significativité	Description du comportement significatif
Altitude	***	préférence pour les altitudes élevées	non réalisé	
Pente	***	préférence pour les pentes faibles	***	préférence pour les pentes faibles et évitement des pentes fortes
Cours d'eau	***	préférence	***	déplacements rapides
Plan d'eau	***	évitement	non réalisé	absence
Conifères	***	évitement	***	ni station ni déplacement rapide
Feuillus	***	préférence	***	stations et déplacements rapides
Peuplements mixtes	***	évitement	**	peu de stations et peu de déplacements rapides
(CFv2) Jeune peuplement ou coupe rase ou indicent : JCI	***	préférence	***	stations et déplacements rapides
(CFv2) Chênes décidus purs	***	préférence	***	stations et déplacements rapides
(CFv2) Hêtres purs	***	évitement	non réalisé	
(CFv2) Mélange de conifères	***	évitement	non réalisé	
(CFv2) Mélange de feuillus prépondérants et conifères	**	évitement	non réalisé	
(CFv2) Mélange de conifères prépondérants et feuillus	NS			
Chemin	NS			
Route à une chaussée	**	préférence	***	stations et déplacements rapides à proximité
Route non goudronnée	**	préférence	***	déplacements rapides
Sentier	NS			
Bâtiment	NS			

*** significatif à 0,1 %	** significatif à 1 %	* significatif à 5 %	NS non significatif

La nomenclature de la BD TOPO® des essences forestières a permis d'émettre l'hypothèse que les cerfs parcourent préférentiellement les forêts de feuillus par rapport à leur présence sur le site d'étude (III-2.1.2). Cette préférence est significative d'après les deux tests statistiques. Il y a une sous-représentation des cellules sans feuillus avec des localisations de cerfs, et une surreprésentation des cellules entièrement couvertes par des feuillus avec des localisations. Le type de mobilité intervient peu : les cerfs stationnent et se déplacent dans les forêts de feuillus. L'évitement des conifères est plus significatif que celui des essences mixtes. De manière générale, les cerfs se situent en dehors des forêts de conifères. Ils n'y restent pas et ne s'y déplacent pas quelle que soit la superficie occupée par ces essences dans la cellule. On observe

aussi une sous-représentation des cellules avec la totalité de surface couverte par des peuplements mixtes et contenant une ou plusieurs localisations. Au contraire, les cellules comportant moins de la moitié de leur surface en peuplements mixtes et des localisations de cerfs sont surreprésentées. Ceci signifie que les cerfs peuvent être présents en lisière des peuplements mixtes mais qu'ils y restent et s'y déplacent peu, comme illustré en Figure III.62.

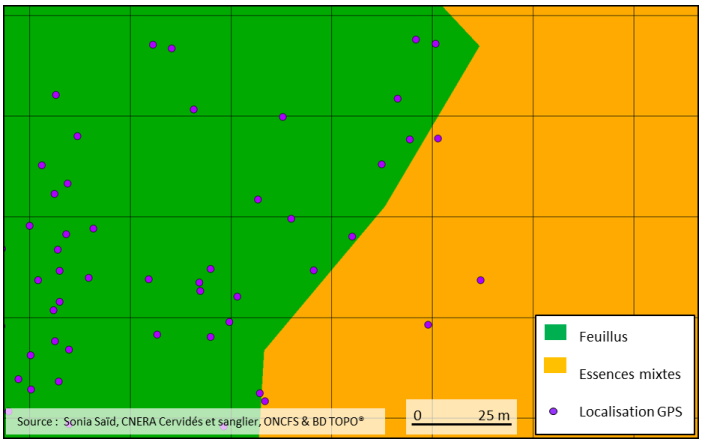


Figure III.62. La préférence des cerfs pour les forêts de feuillus et l'évitement des peuplements d'essences mixtes. Les cellules intégralement couvertes de forêt mixte contiennent 0 ou 1 localisation (déplacement rapide) ; celles avec une partie de forêt mixte et une partie de forêt de feuillus peuvent contenir plusieurs localisations situées en fait dans les feuillus.

Si l'on détaille les essences grâce à la Carte forestière V2, on constate que la préférence envers les forêts de feuillus se précise pour les jeunes peuplements ou coupes rases ou incidents (JCI) et pour les chênaies décidues pures de manière très significative. Les cerfs se situent préférentiellement dans les JCI. Ils y restent et s'y déplacent avec une mobilité moyenne (entre 2 et 4 localisations) et élevée (plus de 5 localisations), en lisère comme au cœur. La classe JCI peut correspondre à un milieu moins fermé que les autres classes d'essences forestières. Or les cerfs exploitent les milieux ouverts (Bouquier, 2003). Ils y trouvent une partie de leur nourriture comme des herbacées et des essences semi-ligneuses qui se développent moins dans les sous-bois fermés. Dans les chênaies, le type de mobilité influence également peu les résultats. De manière significative, les cerfs s'y situent beaucoup pour y stationner comme pour s'y déplacer, aussi bien au milieu qu'en lisière des chênaies. Les feuilles de chênes représentent une nourriture complémentaire qui permet de diversifier leur régime alimentaire d'herbacées et d'essences semi-ligneuses (Krojerova-Prokesova *et al.*, 2010). L'évitement des hêtraies et des mélanges de conifères est très significatif alors que celui des mélanges de feuillus prépondérants et de conifères l'est un peu moins. Ces trois classes de peuplements forestiers sont parcourues rapidement car la plupart des cellules concernées ne contiennent qu'une seule localisation de cerf. L'évitement des mélanges de conifères prépondérants et de feuillus n'est pas significatif. Bien que les cerfs distinguent les lieux de nourrissage et les zones de refuges (Baltzinger, 2003), nous constatons que les peuplements parcourus préférentiellement sont les JCI et les chênaies pures (station et déplacement). Dans l'échantillon de données, les peuplements de conifères sont peu exploités alors qu'ils pourraient l'être lors de phases de repos ou de protection.
L'influence des chemins et des sentiers sur les cerfs n'est pas significative. Par contre, celle des routes forestières (à une chaussée et non goudronnées) l'est à 0,01 de significativité. Pour les routes goudronnées à une chaussée, la surreprésentation des cellules avec une grande portion de voie(s) est observée quel que soit le type de mobilité. Les cerfs restent et se déplacent à proximité des voies. La proximité aux voies de communication constatée en III-2.1.3 avec 44 % des localisations à moins de 20 m des voies, l'est donc en fait principalement pour les routes. La

présence d'herbes le long des voies, due à une luminosité plus importante que dans les sous-bois, peut expliquer cet attrait. Pour les routes non goudronnées, un constat différent peut être formulé, même si le test du Khi² est moins significatif : les cerfs semblent se déplacer rapidement à proximité de ces voies. Cela est dû au fait que les routes non goudronnées sont dans les Vosges parfois assimilables à des chemins de terre, avec une couverture boisée plus importante que pour les routes à une chaussée plus larges. Cette couverture arborée laisse moins passer la lumière, et il peut y avoir moins d'herbes le long des routes. De plus, ces routes peuvent être situées au milieu d'une pente alors que les routes goudronnées sont surtout sur des zones planes plus accessibles par les animaux.
Aucune cellule contenant un bâtiment n'est parcourue par les cerfs. La relation n'est cependant pas significative au vu du caractère forestier du site d'étude.

Comparaison entre l'espace parcouru par les chevreuils et par les cerfs

En plus de la comparaison entre espace parcouru et espace non parcouru par les chevreuils puis par les cerfs, le parallèle entre les deux espèces de cervidés est intéressant. Nous avons effectué le test de Mann-Whitney pour déterminer si la différence de comportement spatial est significative entre les deux espèces. Les résultats sont présentés dans le Tableau III.15 avec les valeurs moyennes des variables pour les chevreuils et les cerfs.

Tableau III.15. Les différences de comportement spatial entre les chevreuils et les cerfs : les résultats du test de Mann-Whitney et les valeurs moyennes pour les deux espèces par élément du paysage.

Caractère de l'espace	Significativité du test de Mann-Whitney	Valeur moyenne pour les chevreuils (par défaut en m²)	Valeur moyenne pour les cerfs (par défaut en m²)
Altitude	***	364 m	309 m
Pente	***	8°	13°
Cours d'eau	***	0,3	5
Plan d'eau	absence	0	0
Conifères	***	1	47
Feuillus	NS	468,2	467,9
Essences mixtes	***	154	102
(CFv2) Jeune peuplement ou coupe rase ou indicent : JCI	***	175	256
(CFv2) Chênes décidus purs	NS	168	194
(CFv2) Hêtres purs	***	43	10
(CFv2) Mélange de conifères	NS	1,2	0,8
(CFv2) Mélange de feuillus prépondérants et conifères	***	54	17
(CFv2) Mélange de conifères prépondérants et feuillus	NS	100	85
Chemin	**	6	7
Route à une chaussée	***	2	6
Route non goudronnée	***	4	8
Sentier	*	0,01	0,2
Bâtiment	absence	0	0

*** significatif à 0,1 %	** significatif à 1 %	* significatif à 5 %	NS non significatif

Même si l'influence du relief est significative dans le même sens pour les chevreuils et les cerfs étudiés séparément, cette influence est également différente entre les deux espèces. Le test de

Mann-Whitney indique que la différence des moyennes d'altitudes et de pentes est très significative. Les chevreuils se situent sur des altitudes plus élevées et des pentes plus faibles que les cerfs. La préférence du chevreuil pour des altitudes supérieures est d'autant plus remarquable que l'écart-type égal est à 22 et qu'il est 3 fois plus faible que dans le cas du cerf où il est égal à 59. Cet écart-type indique que le chevreuil a un comportement moins variable que le cerf. Il se déplace aussi moins que le cerf ce qui peut expliquer cette amplitude moindre dans les valeurs de relief des cerfs suivis. Les écarts-types des pentes sont équivalents pour les chevreuils (7) et pour les cerfs (8). Les chevreuils semblent donc se situer de manière sélective sur les pentes faibles alors que les cerfs se situent sur des pentes plus proches de la moyenne du site d'étude (17°). Les cours d'eau correspondant aux fonds de talwegs sont significativement plus présents à proximité des localisations de cerfs (préférence de leur part) que de chevreuils (évitement).

Concernant les essences forestières, les forêts de feuillus sont parcourues de manière préférentielle et similaire par les deux espèces. Le test n'est pas significatif, ce qui veut dire qu'il n'y a pas de grande différence de couvert en feuillus entre les cellules où sont observés les cerfs et celles où sont les chevreuils : les moyennes et les écarts-types sont quasi égaux. La préférence pour les chênaies n'est pas non plus significativement différente entre les deux espèces, même si la moyenne est un peu supérieure pour le cerf. Par contre, les cerfs préfèrent l'occupation du sol classé en JCI bien davantage que les chevreuils, ce qui correspond à leur préférence alimentaire pour des essences semi-ligneuses et les herbacées poussant en milieu ouvert. L'évitement des hêtraies est significativement variable selon l'espèce ; les cerfs se situent dans des cellules avec un recouvrement moyen 4 fois inférieur que pour les chevreuils. La différence de parcours des forêts mixtes est significative, de même pour les mélanges de feuillus prépondérants avec des conifères correspondant à une classe de forêts mixtes. Nous avions constaté que les chevreuils préféraient ces essences alors que les cerfs les évitaient plutôt. Concernant les conifères, les chevreuils les évitent significativement plus que les cerfs. Cette différence de comportement n'est par contre pas significative lorsque l'on détaille les peuplements : mélange de conifères et mélange de conifères prépondérants avec des feuillus. Le cerf évite en effet également tous les peuplements de conifères, même s'il le fait moins que les chevreuils. Le chevreuil paraît avoir un comportement plus électif que le cerf pour les forêts de feuillus, ce qui inclut des essences préférées comme le chêne ainsi que des jeunes pousses d'arbres, ou des essences moins consommées comme le hêtre. La consommation d'essences plus ou moins intéressantes par le chevreuil correspond peut-être à un besoin de diversification alimentaire ou alors à la traduction de la compétition au sein de la population de chevreuils et avec les autres espèces. Le cerf se situe davantage dans ou à proximité des peuplements de conifères qu'il peut parcourir lors de ses déplacements d'une ressource à l'autre, ressources situées préférentiellement dans les JCI et les chênaies.

Les résultats pour les 4 types de voies de communication sont tous significatifs. La différence de comportement entre les deux espèces envers les chemins et les sentiers est un peu significative. Les chevreuils s'en tiennent davantage éloignés que les cerfs. Les cerfs ne semblaient en effet pas les éviter ni les longer de manière préférentielle. La relation est très significative pour les deux types de routes forestières. Les cerfs se situent davantage dans des cellules avec plus de surface couverte par les voies, ce que l'on peut interpréter par le fait qu'ils se tiennent plus à proximité des voies. Les explications possibles sont, comme observé précédemment, une facilité de déplacement sur des zones planes et surtout des ressources alimentaires intéressantes comme des herbacées.

2.5.3. Les relations entre les éléments du paysage et les déplacements des renards en milieu périurbain

Nous reprenons l'approche statistique pour étudier les préférences spatiales des renards en milieu périurbain, en particulier dans l'agglomération de Nancy. Contrairement au cas des cervidés dans les Vosges, nous avons séparé le site d'étude en 4 sites associés à chacun des 4 renards suivis. Les renards vivent en effet tous dans un milieu périurbain mais avec un taux d'urbanisation variable et des occupations du sol différentes. Les études sur les différences de comportement des renards roux font la distinction entre le milieu rural (Poulle, 1991) et le milieu urbain (Robardet, 2007). Les renards arrivent à s'adapter aux différences entre milieux car ils peuvent trouver des ressources alimentaires et des gîtes de repos qui leur conviennent même en milieu très urbanisé (Wandeler *et al.*, 2003). Nous reprenons trois critères pour définir le taux d'urbanisation des sites des 4 renards dans le Tableau III.16 : la densité des bâtiments, la densité des routes et la superficie en zones arborées. Nous avons défini un gradient d'urbanisation entre ces sites en nous appuyant sur les 3 caractéristiques précédentes et sur la situation des sites par rapport au centre urbain dense. Le site 2 correspondant au renard 2 est le moins urbanisé. Puis nous avons placé le site 3 au vu de l'importance de ses zones arborées et de son emplacement de lisière entre un milieu urbain dense et un milieu boisé. Les sites 1 et 4 sont ensuite les plus urbanisés en considérant leurs densités de bâtiments et de routes et le couvert arboré moins important que dans les sites 2 et 3. Nous pouvons affirmer que le site 2 se distingue des trois autres par son faible taux d'urbanisation (peu de bâtiments et peu de routes). Nous reprenons ces numéros pour les renards et les sites lors de l'interprétation des analyses statistiques.

Tableau III.16. Caractérisation de l'urbanisation des sites d'étude des renards par les bâtiments, les routes et les zones arborées.

Caractérisation des sites des renards	renard 2	renard 3	renard 1	renard 4
Nombre de bâtiments par km²	78	313	267	319
Nombre de routes (1 ou 2 chaussées et autoroute) par km²	26	177	175	120
Pourcentage de superficie occupée par les zones arborées	39,65	39,56	28,48	33,56
Urbanisation :	(-)	(+)	(++)	(++)

Nous nous intéressons aux préférences d'habitat pour préciser la significativité des résultats de la partie III-2.2.1. Ces préférences sont identifiées à partir de la base de données CORINE Land Cover en utilisant le test statistique de Mann-Whitney. Les préférences spatiales sont ensuite étudiées plus précisément à partir des données à grande échelle de la BD TOPO®. Nous utilisons à nouveau une grille d'un pas de 25 m x 25 m qui est caractérisée par le nombre de localisations présentes dans les cellules et par les caractères de l'espace qui nous ont semblé jouer un rôle sur les déplacements d'après les analyses précédentes :

- le relief : altitude et pente ;
- l'hydrographie : les cours d'eau et les plans d'eau ;
- la végétation : les zones arborées sont étudiées, mais sans la distinction des essences et sans une caractérisation de leur structure ;
- les voies de communication selon leur type : sentier, chemin, escalier, piste cyclable, route empierrée (non goudronnée), route à 1 chaussée et à 2 chaussées, bretelle d'autoroute et autoroute ;
- les voies ferrées ;
- les bâtiments ;

- les zones d'activités correspondant sur les sites à des délimitations de l'espace avec une forte activité industrielle, commerciale, d'enseignement ou de loisir.

Nous menons ensuite une analyse multivariée afin de synthétiser les caractères qui semblent les plus significatifs et visualiser les associations entre ces caractères. Nous avons également proposé une méthode afin d'identifier des obstacles aux déplacements parmi les infrastructures linéaires de transports : les voies de communication selon leur type et les voies ferrées. La significativité des résultats des tests statistiques est présentée de la même manière que pour les tests sur les cervidés dans les Vosges.

Les préférences d'habitat

Nous avons lancé le test de Mann-Whitney sur les individus statistiques des cellules de la grille caractérisées. La significativité des résultats et leur interprétation succincte sont indiquées dans le Tableau III.17. Toutes les localisations par individus sont considérées dans ce test, sans distinction des périodes nocturne et diurne car nous cherchons à caractériser les lieux où se situent préférentiellement les renards au niveau de leur habitat quelle que soit l'heure de la journée. Nous avons néanmoins mené en parallèle le test en distinguant les localisations de nuit puis de jour afin de compléter les interprétations (non présenté dans le tableau). Les renards se déplacent peu pendant la journée et restent davantage dans les mêmes occupations du sol que pendant la nuit, ce qui rend les évitements et les préférences spatiales plus significatives. Nous n'avons par contre pas considéré les classes de CORINE Land Cover où se situe aucune localisation des renards, même si ces classes sont présentes dans leur espace parcouru estimé.

Peu de préférences d'habitat ou au contraire d'évitements paraissent significatifs d'après le test de Mann-Whitney qui compare l'occupation du sol des cellules non parcourues avec celle des cellules parcourues par un renard. Les résultats les plus significatifs, et ceci pour trois renards sur quatre, sont ceux concernant les classes des zones urbanisées. Pour le renard 1 et le renard 4 sur les sites les plus urbanisés, l'évitement du tissu urbain discontinu est respectivement très et hautement significatif. Si l'on distingue les périodes diurne et nocturne, l'évitement est très significatif également pour le renard 3 pendant la journée. Le renard 3 reste en effet davantage dans les zones industrielles et commerciales et les espaces verts urbains pendant la journée. Les zones industrielles et commerciales sont parcourues préférentiellement de manière très significative par les renards 1, 3 et 4 sur des sites moyennement et très urbanisés. Ces types de zones parcourues correspondent à différents cas selon les renards : zone commerciale, campus universitaire, terrain de sport, centre équestre, caserne militaire. Le tissu urbain continu est peu présent sur les sites et ne concerne que les renards 1 et 4. Son influence n'est pas significative. Ces résultats correspondent à ceux présentés en III-2.2.1 sur la comparaison entre les superficies des zones industrielles et commerciales présentes dans les sites d'étude respectifs et leurs superficies inclus dans les espaces parcourus par les renards qui sont nettement supérieures.
Les occupations du sol correspondant aux aéroports et aux réseaux routier et ferroviaire ne sont pas associés à des résultats significatifs, ni par individu ni par période de la journée. Ils sont par ailleurs peu présents sur les sites d'étude, représentant en moyenne 2 % des superficies des sites (cf. III-2.2.1).

Tableau III.17. Les résultats du test de Mann-Whitney calculé pour les variables correspondant aux classes de la base CORINE Land Cover, par renard vivant dans des sites distincts : significativité (sign.) et interprétation.

Individu		renard 1		renard 2		renard 3		renard 4	
Taux d'urbanisation		(++)		(-)		(+)		(++)	
Thème d'occupation du sol	Classe d'occupation du sol CORINE Land Cover	sign.	interprétation	sign.	interprétation	sign.	interprétation	sign.	interprétation
Zones urbanisées	Tissu urbain continu	NS						NS	
	Tissu urbain discontinu	**	évite	NS		NS		***	évite
	Zones industrielles et commerciales	***	préfère			***	préfère	***	préfère
Transports	Réseaux routier et ferroviaire	NS						NS	
	Aéroports			NS					
Espaces verts et agricoles aménagés	Espaces verts urbains	NS				NS		NS	
	Équipements sportifs et de loisirs	NS				**	évite	***	préfère
	Terres arables hors périmètre d'irrigation	NS		NS				NS	
	Prairies	NS		NS		NS		NS	
	Systèmes culturaux et parcellaires complexes							*	évite
	Surfaces agricoles, interrompues par des espaces naturels	NS				NS		**	évite
Espaces verts naturels	Forêts de feuillus			NS		NS		NS	
	Forêt et végétation arbustive en mutation					NS		NS	
Zones humides	Plans d'eau	NS						NS	

*** significatif à 0,1 %	** significatif à 1 %	* significatif à 5 %	NS non significatif

Les classes correspondant à des espaces verts et agricoles aménagés ne donnent pas de résultats significatifs. Si l'on sépare les localisations nocturnes et diurnes, les espaces verts urbains sont préférés de manière très significative la nuit par le renard 3 qui reste à proximité d'un bois. Les équipements sportifs et de loisirs couvrent un parc urbain qui est inclus dans les sites d'étude des renards 3 et 4 mais qui n'est parcouru que par le renard 4. Le parcours du parc est effectué préférentiellement par le renard 4 alors qu'il est plutôt évité par le renard 3 qui s'en tient éloigné. Pour les terres arables hors périmètre d'irrigation et les prairies, elles sont surtout

présentes sur le site du renard 2 qui est le moins urbanisé. Les relations sont significatives lorsque l'on sépare la nuit de la journée. Le renard 2 évite ces deux occupations du sol pendant la journée car il se situe uniquement dans les forêts de feuillus. Il parcourt par contre significativement davantage les prairies pendant la nuit. Ces prairies peuvent représenter des ressources alimentaires et se situent entre les forêts et la commune visitée la nuit. Les systèmes culturaux et parcellaires complexes et les surfaces agricoles interrompues par des espaces naturels se situent en périphérie de l'espace parcouru par le renard 4 qui les évite de manière significative. Ce renard ainsi que les renards 1 et 3 sur les sites urbanisés ne se déplacent pas en dehors de l'agglomération urbaine pendant les suivis. Par rapport aux analyses descriptives de la partie III-2.2.1, nous avions remarqué un évitement probable moyen de tous les renards vis-à-vis des terres arables hors périmètre d'irrigation et des prairies, ainsi qu'une préférence pour les espaces verts urbains. Notre analyse statistique par individu et aussi par période permet de préciser et de nuancer les conclusions.
Nous pouvons conclure que les préférences d'habitat significatives concernent surtout les renards en milieu urbanisé (renards 1, 3 et 4). Il ressort qu'en milieu périurbain, les renards évitent le tissu urbain discontinu et préfèrent des zones moins denses comme des zones d'activités, industrielles et commerciales. Pour le renard 2 se déplaçant à la périphérie d'une commune, la distinction entre période diurne et nocturne est d'autant plus marquée qu'il reste dans la forêt la nuit et qu'il parcourt des prairies et des zones plus urbanisées le jour, comme indiqué dans Cavallini & Lovari (1991).

Les préférences spatiales à l'échelle locale

Il paraît moins évident d'identifier les éléments du paysage qui influencent l'emplacement et les déplacements des renards en milieu urbanisé que des cervidés en milieu forestier. La densité du bâti et des routes ainsi que la diversité des structures de zones arborées ont pour conséquence une caractérisation complexe de l'espace autour des localisations. Afin d'identifier les éléments du paysage rencontrés lors des déplacements et ceux qui semblent jouer un rôle, nous proposons d'analyser les éléments du paysage dans lesquels sont observées les localisations de renards. Nous avons vu que les rythmes de déplacements étaient différents entre la période diurne et la période nocturne. Nous reprenons cette distinction afin de présenter les résultats du test de Mann-Whitney sur les comportements spatiaux par renard dans le Tableau III.18. Seul le renard 1 n'est suivi que pendant la nuit, c'est-à-dire lors d'une phase de déplacements plus importants que le jour. Le test compare les moyennes obtenues dans les pixels avec et sans localisations de renard, pour chaque individu et période de la journée.

Le rôle des éléments du paysage peut être abordé de deux façons : soit en considérant un rôle direct sur les déplacements (intérêt pour le renard, obstacle), soit en le considérant comme associé à une occupation du sol particulière (par exemple, la présence de sentiers peut être caractéristique d'une forêt). C'est pour cela que nous avons conservé des éléments qui ont a priori peu d'influence sur les animaux, comme les escaliers ou les pistes cyclables. Les analyses et les connaissances du terrain précédant nos analyses statistiques permettent d'orienter l'interprétation de ces rôles selon les éléments du paysage. Nous remarquons que davantage de résultats significatifs sont obtenus pour la période nocturne que diurne. Cette observation est l'inverse de celle concernant les préférences au niveau de l'habitat à partir de la base CORINE Land Cover qui décrit l'espace moins précisément que la BD TOPO®. Elle est par contre en cohérence avec le fait que les renards se déplacent davantage la nuit. Les renards parcourent alors différentes occupations du sol qui sont décrites par une base de données à grande échelle, et non par la base de données à moyenne échelle.

Tableau III.18. Les résultats du test de Mann-Whitney calculé pour les variables de l'espace correspondant aux données de la BD TOPO®, par renard : significativité (sign.) et interprétation (interp.).

Période	Période nocturne								Période diurne					
Individu	renard 1		renard 2		renard 3		renard 4		renard 2		renard 3		renard 4	
Taux d'urbanisation	(++)		(-)		(+)		(++)		(-)		(+)		(++)	
Caractère de l'espace	sign.	interp.	sign.	interp.	sign.	interp.	sign.	interp.	sign.	interp.	sign.	interp.	sign.	interp.
altitude			**	altitudes basses	***	altitudes basses	NS		NS		*	altitudes élevées	NS	
pente	NS		NS		NS		*	pentes faibles	NS		***	pentes fortes	NS	
cours d'eau	NS		NS		NS		NS		NS		NS		NS	
plan d'eau	NS		NS		NS		***	préfère	NS		NS		NS	
zone arborée	NS		NS		NS		NS		***	préfère	***	préfère	NS	
sentier	NS				*	préfère	**	préfère	NS		NS		NS	
chemin	NS		**	préfère	NS		NS		NS		NS		NS	
escalier	NS		NS		NS		NS		NS		NS		NS	
piste cyclable	NS		NS		NS		NS		NS		NS		NS	
route non goudronnée	NS		*	préfère	NS		NS		**	préfère	NS		NS	
route à 1 chaussée	NS		NS		NS		*	évite	NS		NS		NS	
route à 2 chaussées			NS		NS		NS		NS		NS		NS	
bretelle	**	préfère					NS						NS	
autoroute	NS						NS						NS	
voie ferrée	***	préfère			NS		NS				NS		NS	
bâti	*	évite	NS		***	évite	***	évite	NS		*	évite	NS	
zone d'activités					***	préfère	***	préfère			NS			

*** significatif à 0,1 %	** significatif à 1 %	* significatif à 5 %	NS non significatif

Nous résumons pour chaque renard les résultats significatifs selon le taux d'urbanisation croissant des sites d'étude.

- Le renard 2 qui vit en périphérie d'une commune de l'agglomération de Nancy peu urbanisée reste le jour de manière très significative dans les zones arborées desservies par des routes forestières non goudronnées (lieu d'exploitation des mines de sel interdites d'accès au public). Si l'on considère la période nocturne, le renard est situé à proximité des chemins et des routes non goudronnées de manière préférentielle par rapport au reste du site d'étude. Ces chemins et ces routes se situent en dehors des bois mais dans la partie de la commune visitée la nuit et dans les prairies (cf. préférence notée via la base CORINE Land Cover). L'espace parcouru se situe à des altitudes un peu plus basses.

- Le renard 3 reste à proximité d'un parc boisé le jour, ce qui se traduit par une relation significative de préférence pour les zones arborées sur des pentes fortes et des altitudes plus élevées que sur le reste du site. Le parc en question est situé en altitude mais il n'est parcouru qu'en bordure. La relation d'évitement du bâti est très significative la nuit. L'évitement en période diurne est peut-être moins significatif car le renard bouge peu et moins de pixels sont

concernés par ses localisations que pendant la période nocturne. La nuit, la préférence pour les zones d'activités est très significative. Il s'agit de deux parcs urbains avec quelques sentiers (test significatif), de terrains de sports de l'université et d'une partie du campus. Ces zones correspondent à de grands bâtiments et immeubles qui ont un fort taux de recouvrement du pixel, ce qui accentue l'évitement du bâti par le renard (hautement significatif).

- Le renard 1 est suivi pendant la période nocturne dans une zone très urbanisée. Nous remarquons un évitement significatif des bâtiments car le renard se déplace dans des zones avec un bâti peu dense (caserne militaire, hangars à proximité de la voie ferrée et de l'aire de triage, école). Il se déplace à proximité des voies ferrées, selon une relation de préférence hautement significative, et à proximité de bretelles d'autoroutes selon une relation très significative. Une autoroute traverse l'espace parcouru par le renard 1 au niveau d'une sortie (bretelle). Le renard longe une portion de cette autoroute et la traverse deux fois par un aller-retour vers son probable gîte diurne.

- Pour le renard 4 observé en milieu urbanisé dense, aucune relation n'est significative en période diurne. Cela peut être dû au fait qu'il bouge peu et donc que peu de pixels sont concernés (34 pixels le jour et 113 pixels la nuit). La nuit, le renard 4 parcourt un parc urbain, ce qui explique sa préférence pour les plans d'eau et les sentiers. Il parcourt des zones d'activités de manière hautement significative : un parc de loisirs, l'emplacement d'une caserne et d'un centre équestre, ainsi qu'une zone commerciale. L'évitement des bâtiments est très significatif la nuit à cause de la présence du renard dans le parc urbain et de son parcours de zones commerciales (peu de bâtiments, parkings). On note l'unique relation significative d'évitement des routes à une chaussée. On peut supposer qu'en milieu urbanisé dense, le renard a tendance à éviter les zones fortement urbanisées. On note aussi une relation significative de préférence pour les pentes faibles même si la différence entre les cellules parcourues par le renard et celles non parcourues est petite (moyennes égales à 3° et à 3,8°).

La caractérisation des comportements des quatre renards peut être mise en relation avec le taux d'urbanisation des sites d'étude respectifs. Le site 2 se caractérise par un faible taux d'urbanisation par rapport aux trois autres et nous retrouvons cette différence dans les comportements des renards. Le renard 2 présente des préférences spatiales particulières. L'influence des voies non goudronnée est plutôt positive car ces voies sont présentes dans les prairies et dans les bois exploités. Pour les autres renards en milieu urbanisé plus dense, on note une seule relation significative d'évitement vis à vis des routes pour un renard et une proximité à des bretelles d'autoroute pour un autre renard. Nous notons une préférence de la part d'un renard à proximité d'une voie ferrée. Cette infrastructure linéaire peut présenter un intérêt lors des déplacements, comme mentionné dans Trewhella & Harris (1990). Les zones situées autour des voies ferrées présentent souvent un espace non habité avec peu de présence humaine, et sur lequel se développe la végétation (friche par exemple). Dans les analyses descriptives, la préférence pour les zones arborées semblaient marquée à très grande proximité des renards (moins de 50 m). La préférence pour les zones arborées est bien validée pendant les périodes diurnes mais pas lors de déplacements plus importants en période nocturne. Le jour, deux des renards stationnent dans de grandes zones arborées comme un bois (site 2 de faible urbanisation) ou un parc urbain (site 3 d'urbanisation moyenne). La relation d'évitement nocturne du bâti est significative pour les trois renards en milieu urbanisé dense, ce qui est lié à leur parcours de zones correspondant à une densité faible de bâtiments et de zones d'activités peu bâties (parc, parking, campus). Dans ces mêmes cas, le bâti a peu d'influence le jour car les renards peuvent rester au même endroit dans les jardins des habitations ou des bois proches d'habitations ou de bâtiments publics.

L'évitement des routes et la préférence pour les zones arborées ne correspondent pas à des relations significatives d'après notre méthode. Ces hypothèses sont cependant conservées au vu des analyses descriptives présentées en III-2.3.2. Il faudrait voir si des cellules avec un pas plus petit que 25 m donneraient des résultats différents. Les relations peuvent ne pas être significatives car l'évitement des routes et la préférence pour les zones arborées s'effectuent à une échelle spatiale plus petite correspondant à des préférences d'habitat, et non à une échelle locale sur les choix de direction lors des déplacements. Cette analyse est toutefois insuffisante pour caractériser les obstacles. Les relations d'évitement sont d'une part moins nombreuses (5 dans le Tableau III.18) que les relations de préférence (au nombre de 12). D'autre part, la relation de préférence ne peut exclure un rôle d'obstacle, comme par exemple, lorsqu'un individu longe une infrastructure linaire mais ne la traverse pas.

Analyse multivariée des éléments du paysage et des localisations des renards

Nous souhaitons déterminer si certaines associations entre éléments du paysage sont observées en fonction du comportement des renards. La méthode utilisée est une analyse multivariée, l'analyse en composantes principales (ACP), qui permet de synthétiser des informations. L'ACP lit des variables quantitatives et cherche des relations linéaires entre les variables (Husson *et al.*, 2009). Elle a pour avantage de lire des variables sur un échantillon d'individus le long d'axes factoriels qui sont une composition de ces variables. Les axes sont classés de celui qui résume le mieux les différences entre les individus à celui qui les résument le moins. Ce principe nous a semblé intéressant pour résumer les caractéristiques des paysages parcourus par les animaux. Cela permet de regrouper leurs localisations selon la ressemblance. Une ACP est réalisée par renard, chacun étant suivi dans des sites plus ou moins urbanisés. Les individus statistiques sont les cellules de la grille créée d'un pas de 25 m contenant les localisations du renard concerné. Les variables prises en compte concernent la description de l'espace ; elles sont listées en début de la partie III-2.5.3 et correspondent à la superficie occupée par type d'élément du paysage dans les cellules sélectionnées. Selon les sites, certaines variables sont absentes, comme par exemple les voies ferrées qui ne sont présentes qu'à proximité des localisations du renard 1 et du renard 4. Nous avons constaté que le rythme de déplacement des renards opposait la période nocturne et la période diurne. Trois autres variables sont donc considérées afin de relier les caractéristiques de l'espace au comportement des renards : le nombre de localisations comptabilisées par cellules, puis le nombre de localisations en période diurne et celui en période nocturne. Pour le renard 1, les localisations sont enregistrées pendant la nuit, entre 17 h et 5 h 30 le lendemain. Nous n'avons pas pris en compte le nombre de localisations car toutes les cellules ne contiennent qu'une seule localisation sauf une cellule qui en contient 3. Nous avons par contre créé une variable sur la chronologie des localisations. La variable de chronologie est la durée écoulée en minutes entre l'heure de début du suivi (17 h) et l'heure de la localisation. Par exemple pour une localisation enregistrée à 22 h 30, la valeur de la variable sera de 330 min. Les variables ont des intervalles de valeurs différents ; elles sont alors centrées et normées. Nous avons utilisé la fonction *pca* du logiciel R pour mener ces analyses. Les résultats des 4 analyses en composantes principales sont résumés en Tableau III.19, avec les variances décrites par les deux premiers axes factoriels calculés. Les axes définis par l'ACP dépendent de chaque individu. Les variances cumulées des axes sont relativement faibles, en-dessous de 50 %. Cela signifie entre autres que les variables contribuent à plusieurs axes, et que les caractéristiques de l'espace autour des localisations ne sont pas très corrélées. Nous avons également calculé en parallèle la matrice de corrélation de Pearson entre les variables testées afin de mettre en évidence les éléments du paysage associés hors du comportement de déplacement des renards.

Tableau III.19. Les résultats des 4 analyses en composantes principales centrées réduites, calculées par renard dans l'agglomération de Nancy, pour les cellules de la grille contenant les localisations enregistrées.

Données	ACP 1	ACP 2	ACP 3	ACP 4
Individu suivi	renard 1	renard 2	renard 3	renard 4
Taux d'urbanisation du site étudié	fort (++)	faible (-)	moyen (+)	fort (++)
Durée de la période d'étude	12 h (de nuit)	24 h	24 h	24 h
Individus pris en compte dans l'ACP	37 pixels	45 pixels	83 pixels	137 pixels
Variables ACP	1 décompte des localisations (total de nuit) + 11 natures d'occupation du sol	3 types de décompte des localisations (total, diurne, nocturne) + 11 natures d'occupations du sol		
Résultats	Variance décrite (en %)			
Axe1	24	27	28	16
Axes 1 et 2	42	44	47	28
Axes de l'ACP	Variables associées par les axes de l'ACP			
Axe 1+	En seconde partie de nuit, fréquentation des zones d'activités, situées à proximité du tronçon autoroutier à des altitudes plus élevées.	En période diurne, les localisations sont dans les zones de végétation arborée situées un peu en altitude.	En période diurne, localisations dans des zones boisées, surplombantes (altitudes plus élevées) et sur fortes pentes.	En période diurne, localisations dans des zones partiellement recouvertes par de la végétation arborée.
Axe 1-	En début de nuit, déplacement autour de la voie ferrée et dans des zones plus ou moins arborées.		En période nocturne, localisations dans les zones bâties à proximité des voies à une chaussée.	Zones d'activités, présence d'eau, situées en altitude.
Axe 2+	L'axe 2 n'associe pas l'occupation du sol et les déplacements et il n'apporte pas d'éléments éclairants pour l'interprétation de l'axe 1.	Les zones fortement couvertes de végétation arborée sont associées à de plus hautes altitudes et de plus fortes pentes.	Nombre important de localisations diurnes (pour 2 cellules) dans des zones contenant du bâti.	Les zones de végétation arborée, sur forte pente et à plus haute altitude, sont associées par l'axe avec des tronçons autoroutiers et ferrés et avec des zones d'activités. Les corrélations observées sont faibles, ces modalités concernant les cellules sur lesquelles le renard se déplace rapidement de nuit.
Axe 2-		Parcours nocturne dans des zones contenant du bâti.	Zones d'activités.	Zones bâties, avec des routes à une chaussée.

Pour le renard 1, nous constatons que la variable de chronologie des localisations est principalement associée à l'altitude, aux zones d'activités et au tronçon autoroutier. Cette variable est inversement associée à la proximité des voies ferrées. Cela signifie que le renard se déplace autour de la ligne ferroviaire, en début de nuit entre 17 h et 2 h du matin. En seconde partie de nuit entre 2 h et 5 h 30 (fin du suivi), le renard s'éloigne des alentours de la voie ferrée et parcourt une autre zone de prospection autour du tronçon autoroutier. Cette zone est située

à la sortie du tronçon autoroutier et est proche d'un parking extérieur (celui du parc des expositions). Le renard 1 y effectue une excursion d'une demi-heure vers 4 h du matin. Il traverse le tronçon autoroutier pour aller vers une zone mixte, résidentielle et d'activités, notamment occupée par une caserne et un centre équestre (voir la carte en Figure III.63). On constate qu'en milieu très urbanisé, ce renard effectue en début de nuit un parcours d'approche dans des zones plus sûres avec moins de dérangements en général : le long de la voie ferrée dans des zones comportant de la végétation arborée. En milieu de nuit, il va rejoindre d'autres zones susceptibles de lui offrir des ressources alimentaires, à une heure où les dérangements sont moindres. Dans ce site très urbanisé, les ressources alimentaires peuvent être trouvées plutôt dans des zones a priori tranquilles autour de la voie ferrée ainsi que dans des zones d'activités diverses. La proximité avec le tronçon autoroutier peut laisser supposer qu'il représente un certain obstacle car le renard cherche à le traverser pour atteindre des zones potentiellement intéressantes et tranquilles (de l'autre côté de l'autoroute : caserne et un centre équestre).

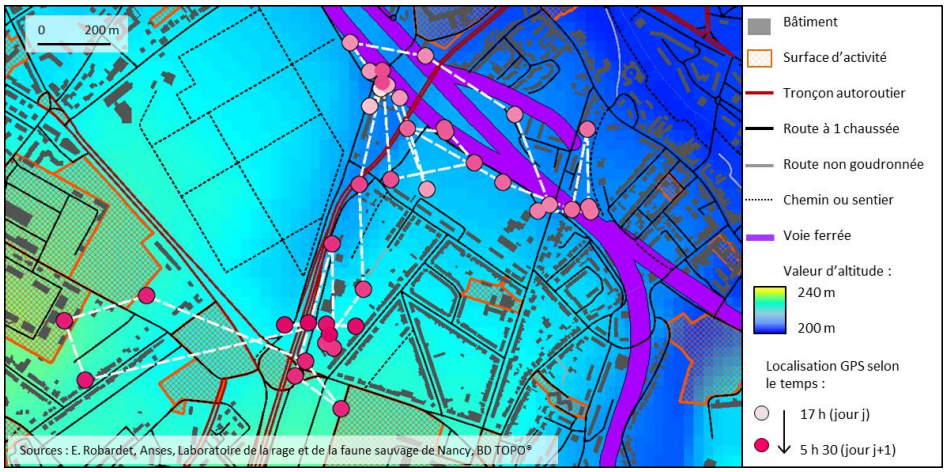


Figure III.63. Cartographie des localisations du renard 1 selon l'heure de l'enregistrement, et des éléments de l'espace contribuant aux axes factoriels : altitude, voie ferrée et tronçon autoroutier. Les bâtiments et les autres routes permettent de mieux visualiser l'occupation du sol sur le site.

Le renard 2 est observé en milieu peu urbanisé. Les résultats de l'ACP 2 mettent en avant le fait que les bois situés légèrement en altitude sont utilisés pendant la période diurne. Les regroupements de localisations dans une même cellule de la grille correspondent surtout à la période diurne, moment où le renard bouge peu. Le second axe met en opposition les zones arborées en altitude et en pente avec le parcours nocturne du renard près des bâtiments. En milieu faiblement urbanisé, le renard a un comportement correspondant à celui de l'espèce, à savoir le repos diurne dans des zones forestières à faible dérangement humain, et un comportement mobile la nuit à la recherche de ressources alimentaires dans des zones bâties. Dans ce milieu, les zones bâties sont associées à des jardins où la recherche de nourriture peut être fructueuse.

En milieu moyennement urbanisé, on retrouve pour le renard 3 la différence de comportement entre les périodes nocturne et diurne. La journée, le renard se déplace à côté d'un gîte sur les pentes d'un bois urbain surplombant le reste du site. Cet emplacement offre une certaine tranquillité car il y a peu de dérangement humain, ce qui peut expliquer son intérêt. Le nombre important de localisations diurnes dans une zone très restreinte (2 cellules) assez fortement bâtie suggère que son gîte est situé à proximité de celle-ci. En effet, le renard reste à proximité d'un bâtiment qui est situé à la lisière du bois. Ce bâtiment est à l'écart des autres bâtiments et

des chemins menant au bois et pouvant être empruntés par des marcheurs. Il donne sur une impasse routière peu fréquentée. La nuit, les déplacements sont plus rapides correspondant à peu de localisations par cellule. Lors d'une excursion entre minuit et 2 h du matin, le renard se déplace dans des zones bâties pavillonnaires où il va rechercher des ressources alimentaires. Ces zones sont situées à proximité d'axes de circulation mais le dérangement est minimisé par une fréquentation nocturne plus faible. Sinon, la nuit, il reste surtout dans des zones d'activités à proximité du bois urbain – campus, terrains de sport, parc – dans lesquelles le renard revient plusieurs fois avant l'aube et en soirée pendant les 24 heures de suivi de 22 h à 22 h le lendemain.

Le renard 4 parcourt le site le plus urbanisé. La contribution des premiers axes est faible, égale à 28 % pour les deux premiers. Les variables sont aussi faiblement corrélées entre elles. L'ACP 4 calculée sur l'ensemble des variables indique que la période diurne correspond à une faible mobilité. Le gite diurne du renard 4 est localisé dans un habitat de substitution, constitué de zones avec une couverture ligneuse moins importante, correspondant à des jardins localisés en arrière-cour de pavillons résidentiels attenants à un centre équestre. L'analyse ne met pas en évidence une caractérisation importante des déplacements nocturnes. On remarque cependant que les localisations nocturnes sont peu regroupées (déplacement rapide) hors des zones d'activités qui sont un parc urbain et une caserne (superposition avec l'espace parcouru par le renard 1). De plus, les résultats indiquent que les zones couvertes de végétation arborée sont associées à des sources de dérangement (voies ferrées et routières importantes). Ces zones forment un ensemble spatial cohérent dans lequel des zones d'activités sont bien représentées par quelques pixels situés de l'autre côté de l'autoroute que le gîte diurne et que le parc urbain exploité. Elles sont parcourues rapidement de nuit entre 2 h et 3 h du matin, au moment où le dérangement est minimisé, à la recherche de ressources disponibles dans ces zones d'activités commerciales.

Les résultats des ACP confirment ceux du test de Mann-Whitney menés précédemment et les interprétations se rejoignent. Les ACP consistent en une approche plus synthétique et nous ont permis d'inclure le nombre de localisations distinguées entre le jour et la nuit, ainsi qu'une variable temporelle pour les déplacements nocturnes d'un des renards. Les axes factoriels opposent bien les déplacements diurnes et nocturnes, qui sont associés à des types d'occupation du sol spécifiques. Pour le renard 1 étudié seulement de nuit, les axes opposent les déplacements en début et fin de nuit. Nous retrouvons les déplacements faibles en période diurne pour les trois renards suivis pendant 24 h. Par ailleurs, le taux d'urbanisation est associé à une adaptation de cette espèce généraliste qui adopte des habitats de substitution diurnes et nocturnes. En milieu peu urbanisé, le gite diurne va être localisé dans des bois à faible dérangement. En milieu moyennement urbanisé, les zones boisées peuvent être voisines de zones bâties. En milieu très urbanisé, les zones arborées importantes peuvent être associées avec des infrastructures génératrices de dérangement et le gîte diurne se localise dans un habitat de substitution (jardins pavillonnaires à proximité d'un centre équestre). La recherche nocturne de nourriture se réalise dans des jardins en milieu de peu à très urbanisé, et dans des zones d'activités en milieu très urbanisé moins fréquentées par les hommes la nuit que le jour et offrant des espaces larges de déplacement avec peu d'obstacles (faible dérangement de nuit compensant la présence d'infrastructures de transport, relative abondance de ressources).

Les obstacles aux déplacements

Nous proposons à présent une approche spécifique afin d'identifier des obstacles au déplacement, c'est-à-dire des éléments du paysage qui limitent les déplacements des renards.

Nous nous intéressons en particulier aux infrastructures de transport linéaires – voies de communication pédestres, routières et voies ferrées – qui représentent a priori un frein au déplacement à cause de leur nature et du trafic. Dans la partie III-2.3.2, nous avions étudié la composition des voies de communication présentes dans le voisinage des localisations selon un gradient de distance. Il ressortait que pour sur le site 2 en périphérie d'agglomération, le renard se tenait plus proche des voies non goudronnées (chemin et routes empierrées) que des routes goudronnées (routes à 1 chaussée). Sur les autres sites, nous n'avons pas pu conclure à un effet de barrière des routes car les renards se situaient à grande proximité des routes, surtout à 1 chaussée qui sont majoritaires sur ces sites. Nous avions néanmoins remarqué en partie III-2.1.4 que le nombre de traversées était proportionnellement moins important pour les routes à 1 chaussée que pour les sentiers, ce qui peut indiquer un effet de barrière relatif des routes. Nous souhaitons apprécier la significativité des résultats pour l'ensemble des voies de transport, ceci par type de site d'étude plus ou moins urbanisé, et donc dans notre cas par renard suivi. Nous étudions les voies situées au voisinage des trajectoires linéaires interpolées. Parmi ces voies à proximité, les voies traversées et les voies non traversées sont distinguées. Cette distinction permet de mettre en évidence si les voies représentent un obstacle. Dans ce cas, le renard peut longer les voies ou se situer à proximité mais sans les traverser. La Figure III.64 illustre un extrait des localisations du renard 1. Dans cet exemple, le renard se tient dans un voisinage de 20 m de trois routes à 1 chaussée et il en traverse une seule. Il traverse par contre une fois chaque tronçon de voie ferrée et trois fois la route à 2 chaussées séparées. La Figure III.37 (a et c) illustre deux renards longeant une voie ferrée.

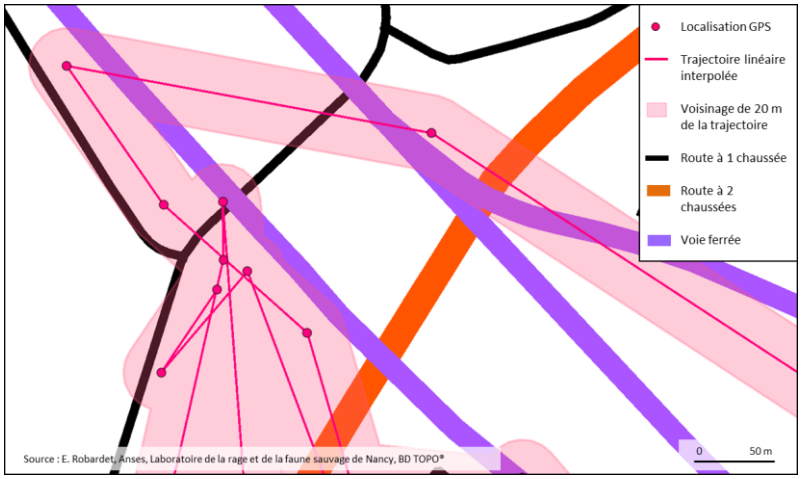


Figure III.64. L'approche pour déterminer l'effet de barrière des voies de transport : comparaison entre les traversées de voies et entre les voies à proximité de la trajectoire linéaire.

Les individus statistiques sont les voies dans le voisinage des localisations. Dans un premier temps, nous avons eu une approche par segment de la trajectoire linéaire. Nous avons comparé le nombre de fois qu'une voie se trouve à proximité d'un segment et qu'elle n'est pas traversée, avec le nombre de fois qu'elle est à proximité et traversée. Pour cela, nous avons appliqué le test de Mann-Whitney et comparé la moyenne des traversées et la moyenne des non-traversées par voie. Les voies proches sont sélectionnées à partir d'un buffer autour de la trajectoire. Les voies traversées sont comptées à partir de la trace linéaire. Les types de voies considérés sont les suivantes :

- les voies non goudronnées : sentiers, chemins, routes empierrées ;
- les routes à 1 chaussée ;
- les routes de trafic important (à 2 chaussées) et les autoroutes (dont les bretelles).

Nous avons appliqué le test de Mann-Whitney également pour les voies ferrées.

Dans un second temps, nous avons souhaité tester l'importance du rôle d'obstacle. L'approche s'effectue de manière absolue sur les voies et le nombre de traversées est calculé sur l'ensemble de la trace. Nous voyons par exemple en Figure III.64 la différence entre le dénombrement des traversées par segment de trajectoire et le dénombrement pour l'ensemble de la trajectoire. Le second dénombrement a tendance à minimiser le rôle d'obstacle car il ne prend pas en compte le nombre de fois où le segment est proche de la route et de la voie ferrée (au centre de la figure) et où le renard ne les traverse pas, ce qui nous fait qualifier cette approche d'identification du rôle de barrière de manière absolue. Dans ce cas, le type de voie et le nombre de traversées des voies sont les deux variables testées. Si le nombre de traversées est nul alors cela peut signifier un rôle d'obstacle. Si la voie n'est traversée qu'une seule fois, son rôle d'obstacle peut être moins important mais sa traversée n'est pas anodine. Lorsqu'il y a plus de deux traversées, alors le rôle d'obstacle est moindre. Nous avons utilisé le test du Khi² afin de déterminer la significativité des relations entre les types de voies et le nombre de traversées. Si le nombre d'individu par classe le permet (plus de 5 individus), nous avons créé trois classes du nombre de traversée : 0 fois, 1 fois et 2 fois et plus. Sinon, deux classes sont considérées : voie non traversée et voie traversée une ou plusieurs fois.

Les résultats du test de Mann-Whitney sont présentés dans le Tableau III.20 par renard pour conserver l'approche par type de site d'étude que nous avons eue précédemment. La distance de voisinage (rayon du buffer) est égale à 10 m, à 20 m et à 50 m afin de considérer les traversées par rapport à un espace de plus en plus large. Lorsque le voisinage est grand, le nombre de voies traversées diminue relativement par rapport au nombre de voies proches mais non-traversées. Les déplacements pendant 24 h sont considérés (sauf pour le renard 1 suivi pendant 12 h) car l'effet de barrière est considéré pour l'ensemble des activités. En période diurne lorsque les renards se déplacent peu, les voies peuvent être à proximité mais ne pas être traversées, ce qui entraîne peut-être dans les résultats une légère surestimation des effets de barrière. Cependant les résultats obtenus pour le renard 1 et les autres sont cohérents.
D'après les résultats de Tableau III.20, le test est significatif dans la plupart des cas avec un nombre de voies traversées moindre que le nombre de voies non traversées par les segments. Nous notons à nouveau la différence entre les sites sur lesquels vivent les renards. Le renard 2 en milieu peu urbanisé est moins à proximité des voies et l'étude de l'effet de barrière est moins pertinente. Le renard 3 se déplace entre un milieu faiblement urbanisé et une zone qui l'est fortement. Comme pour le renard 2, aucune route importante, autoroute ou voie ferrée n'est présente dans un voisinage de moins de 50 m de sa trajectoire.
Concernant les voies non goudronnées, nous remarquons que le nombre de traversées est significativement moins important qu'à partir d'un rayon de voisinage de 50 m. Cela indique que lorsque les renards sont à proximité de ces voies, à moins de 20 m, ils n'évitent pas leurs traversées, et pour le renard 4 il y a même significativement plus de traversées.
Les routes à 1 chaussée correspondent à des relations significatives. Lorsque les routes sont très proches, à moins de 10 m, les deux renards des sites les plus urbanisés (1 et 4) sont associés à des résultats significatifs : un évitement des traversées et une préférence. Cela montre que lorsque les routes sont très proches en milieu très urbanisé, les renards peuvent les longer (et ne pas les traverser) ou chercher à les traverser. Pour trois des renards, les routes à 1 chaussée sont moins traversées même si elles sont proches de moins de 20 m. Cela pourrait valider un effet de barrière. Cette relation est significative pour les quatre renards lorsque l'on considère un voisinage de 50 m.
Les voies plus importantes ne sont présentes que dans les milieux les plus urbanisés où vivent les renards 1 et 4. Les routes à 2 chaussées et les autoroutes sont moins traversées dans un voisinage de moins de 50 m par le renard 1. Ce renard vit en effet à proximité d'un nœud de

transport avec une autoroute et une voie ferrée, ce qui confirme un effet de barrière des routes importantes même si elles peuvent être traversées si besoin. Pour le renard 4, l'effet de barrière est aussi remarqué à partir de 50 m de manière très significative. Cela peut montrer qu'en milieu très urbanisé, les renards s'approchent moins des routes importantes que des routes à 1 chaussée et que lorsqu'ils s'en approchent, c'est pour les traverser.
Les voies ferrées sont moins traversées par le renard 1 de manière très significative à partir de 20 m. Le comportement du renard est de longer les voies ferrées à une certaine distance. Il ne longe probablement pas les rails mais les bas-côtés. Le renard 4 semble également longer les rails à une distance de 50 m plutôt que de les traverser selon une relation significative.

Tableau III.20. Les résultats du test de Mann-Whitney de comparaison du nombre de traversées et de non-traversées des voies à proximité des segments de la trajectoire, par renard : significativité (sign.) et interprétation (interp.).

Type d'infrastructure de transport linéaire	Rayon de voisinage	renard 1		renard 2		renard 3		renard 4	
		urbanisation (++)		urbanisation (-)		urbanisation (+)		urbanisation (++)	
		38 segments		94 segments		152 segments		397 segments	
		sign.	interp.	sign.	interp.	sign.	interp.	sign.	interp.
voie non goudronnée	10	NS		NS		NS		*	plus de traversée
	20	NS		NS		NS		NS	
	50	***	moins de traversée	*	moins de traversée	***	moins de traversée	***	moins de traversée
route à 1 chaussée	10	**	moins de traversée	NS		NS		**	plus de traversée
	20	***	moins de traversée	NS		***	moins de traversée	*	moins de traversée
	50	***	moins de traversée	**	moins de traversée	***	moins de traversée	***	moins de traversée
route importante et autoroute	10	NS						NS	
	20	NS						NS	
	50	**	moins de traversée					***	moins de traversée
voie ferrée	10	NS						NS	
	20	***	moins de traversée					NS	
	50	***	moins de traversée					*	moins de traversée

*** significatif à 0,1 %	** significatif à 1 %	* significatif à 5 %	NS non significatif

L'étude de l'effet de barrière de manière absolue en utilisant l'ensemble de la trajectoire est effectuée à partir du nombre de traversées des voies de communication à proximité des renards. Le renard 2 n'est pas pris en compte dans cette analyse car il y a trop peu de voies distinctes selon les classes de nombre de traversées. Le test du Khi² lancé sur le nombre de traversées par type de voie ne donne qu'un seul résultat significatif. Le constat est logique car cette analyse prend en compte pour chaque voie toutes les traversées pendant la durée du suivi, 12 h ou 24 h, et limite la prise en compte des cas où le renard s'approche d'une voie mais ne la traverse pas. La relation significative est observée pour le renard 1 dans un voisinage de 50 m. Le test du Khi² montre que les routes importantes (2 chaussées, bretelles et autoroutes) sont plus traversées qu'attendu alors que c'est l'inverse pour les routes à 1 chaussée, pour un nombre de traversées supérieur à 2. Ceci peut être interprété par le fait que le renard s'approche des routes

importantes pour finalement les traverser alors qu'il peut longer davantage des routes à 1 chaussée. Cela signifie aussi qu'il y a moins de routes à 1 chaussée traversées plusieurs fois que de routes importantes : le renard traverserait alors à peu près au même endroit les routes importantes. Il effectuerait une boucle lorsqu'il est éloigné de ces voies, ce qui fait que les routes sont majoritairement traversées qu'une seule fois. La distance de 50 m est cependant relativement importante et il est difficile de préciser quelle est la perception exacte des animaux par rapport aux éléments du paysage. Il n'y a pas assez de voies non goudronnées pour les comparer aux deux autres types de voies. Pour les renards 3 et 4, nous n'avons pas eu de résultats quant à l'importance de l'effet de barrière des routes à 2 chaussées et des routes à 1 chaussée par rapport aux voies non goudronnées.

En conclusion, l'effet de barrière est surtout constaté pour les routes à 1 chaussée, moins traversées, alors qu'elles sont à proximité des renards. Pour les voies non goudronnées et les routes importantes, les relations sont un peu moins significatives, ce qui peut être dû à un échantillon de données de déplacement d'une durée trop courte. Nous constatons que les voies ferrées ont également un effet barrière car elles sont significativement peu traversées. Nous avons vu précédemment qu'il y a une préférence près des voies ferrées, ce qui confirme que les renards peuvent exploiter les alentours des voies sans les traverser. Dans les deux autres suivis de renards, à Annemasse et à Pontarlier, leur présence près de voies ferrées est aussi constatée et une préférence serait à valider statistiquement. Cette possible préférence ne pourrait être mise en lien avec le nombre de traversées étant donné la fréquence temporelle des localisations, mais elle pourrait confirmer l'intérêt possible des alentours des voies ferrées dans des milieux urbanisés. L'étude de ces deux cas représente une perspective de prolongement des analyses de données.

L'approche statistique a permis de confirmer les préférences et les évitements significatifs des animaux par rapport aux différentes composantes de l'espace. Comparativement, nous pouvons affirmer que la sélection envers les éléments du paysage semble plus marquée pour les cervidés dans les Vosges que pour les renards en milieu périurbain. Nous pouvons néanmoins définir les éléments de l'espace fonctionnel utilisé par les trois espèces animales.
Les renards ont une préférence pour les zones arborées en période diurne et ils ont tendance à rester éloignés des bâtiments de manière générale. Selon les espaces parcourus par les différents individus, une proximité préférentielle à certains éléments particuliers est confirmée : voie ferrée, zone d'activités, voies de communication. Les obstacles aux déplacements ont été identifiés à partir de l'étude des traversées. Il apparaît que les routes à une chaussée ainsi que les voies ferrées représentant un obstacle puisqu'elles sont davantage longées que traversées. Ces préférences peuvent varier selon le taux d'urbanisation.
L'espace fonctionnel des chevreuils est constitué de pentes faibles (moyenne égale à 8°) et des peuplements forestiers de feuillus avec une préférence pour les chênaies et les jeunes peuplements. Les cerfs parcourent également les pentes faibles (moyenne égale à 13°). Ils longent préférentiellement les routes forestières de manière significative. Les cerfs présentent une préférence significative plus prononcée que les chevreuils pour les jeunes peuplements et les chênaies, mais ils évitent moins les parcelles composées principalement de conifères.

3) DISCUSSION SUR LES RÉSULTATS D'ANALYSES ET SYNTHÈSE

Les résultats des analyses de données ont permis une caractérisation des déplacements des animaux. Les conclusions sont à mettre en perspective avec d'autres études existantes menées sur ces mêmes espèces ou sur des espèces similaires. Les méthodes que nous avons employées sont inspirées de l'état de l'art tout en étant adaptées à la particularité de nos cas d'étude. Nous revenons dans cette partie sur les résultats d'analyses et leur comparaison avec des exemples de la littérature. Nous les présentons en reprenant les questionnements posés dans le chapitre précédent en II-3.3.

3.1. La détermination des distances et des rythmes de déplacements

Le questionnement concerne la caractérisation des distances parcourues par les animaux ainsi que leur rythme de déplacement. Ces rythmes sont liés aux activités des animaux et à leur parcours et leur utilisation des éléments du paysage. Lors de la lecture des données GPS, nous nous sommes dans un premier temps attachée à identifier quelles étaient les localisations avec des coordonnées spatiales valides. La suppression des échecs d'enregistrements rompt la régularité des intervalles de temps, ce qu'il faut considérer lors de la comparaison des distances parcourues. Dans Klein *et al.* (2006), les localisations correspondant à une valeur de PDOP inférieure à 6 sont considérées comme suffisamment précises. Certaines des localisations que nous avons prises en compte peuvent donc être qualifiées d'imprécises. Cependant, toutes celles qui correspondent à une PDOP supérieure ne sont pas forcément mauvaises et certaines qui ont une PDOP inférieure peuvent être visiblement fausses. Nous avons donc conservé a priori toutes les localisations quelle que soit la valeur de PDOP. Cela a aussi pour but de ne pas trop influencer l'étude du voisinage spatial des localisations. Nous avons vu en effet dans le chapitre I que ce voisinage peut jouer un rôle sur la précision des données à cause d'un effet de masque sur le signal. Si des localisations sont supprimées dans des zones de relief ou de végétation car elles ont un indice de précision faible, alors cela peut surestimer ou sous-estimer l'utilisation d'un certain type d'occupation du sol par les animaux.

3.1.1. L'estimation des domaines vitaux et des espaces parcourus

Nous avons commencé par estimer la surface parcourue par les animaux à partir des coordonnées spatiales planimétriques des localisations enregistrées. Cette surface peut être qualifiée de domaine vital si le nombre de localisations connues est suffisamment grand et la durée totale du suivi longue. Dans nos cas d'étude, les suivis des renards à Annemasse et à Pontarlier correspondant à des relevés VHF pendant plusieurs jours répondent davantage à l'estimation des domaines vitaux que les suivis des renards par GPS à Nancy sur une seule journée. Dans le cas d'étude sur les cervidés dans les Vosges, il s'agit de suivis individuels avec des fréquences temporelles élevées au cours de cinq journées au plus. Nous avons alors estimé à partir des localisations sur une journée l'espace parcouru pendant ce laps de temps. Cette estimation donne toutefois une indication sur le type d'espace parcouru et utilisé habituellement dans un rythme quotidien. Dans l'échantillon de Nancy, un renard est suivi sur deux journées distinctes. Nous constatons une certaine constance dans les lieux visités. Son gîte de repos se situe vers le même emplacement entre des jardins privés et un centre équestre. Il se déplace également dans le même parc de loisirs. Des différences existent car le renard traverse par exemple l'autoroute pendant une des nuits de suivis alors qu'il reste du même côté la

seconde nuit. Dans les Vosges, les suivis sur les chevreuils et les cerfs s'étalent entre 98 et 224 jours, ce qui permet une appréciation des différences entre les journées à des périodes de l'année différentes. Les espaces parcourus quotidiennement sont similaires entre les individus. Ils le sont d'autant plus pour les chevreuils qui se déplacent sur un espace plus petit que les cerfs. Pour les cerfs, il y a en moyenne 25 % (entre 22 % et 28 %) de superposition deux à deux entre les espaces parcourus quotidiennement par les individus. Pour les chevreuils, ce pourcentage est en moyenne de 27 % (entre 24 % et 32 %). Pour les deux espèces, les recouvrements des espaces parcourus quotidiennement sont similaires. Cela montre une variation de ces espaces entre les journées. Il est donc important de considérer plusieurs journées dans l'estimation des domaines de vie. Le mieux est d'avoir un compromis entre la fréquence temporelle et la durée de suivi. C'est le cas pour les enregistrements sur les chevreuils à Aurignac. L'étendue des espaces parcourus pendant une année est beaucoup plus élevée que celle des espaces quotidiens, d'un rapport d'environ 1 pour 50 entre les chevreuils suivis dans les Vosges et ceux à Aurignac d'un point de vue de leurs espaces parcourus estimés par enveloppe convexe. Cette différence est due aux dispersions définitives (principalement parmi les jeunes et les yearlings) ou temporaires (surtout des adultes). Pour pouvoir comparer les cas d'étude, il est plus pertinent d'utiliser des extraits de données avec une fréquence temporelle et une durée similaire, par exemple un extrait pendant une journée ou pendant quelques heures de déplacement.

Afin de détailler l'intensité de l'utilisation de l'espace, les limites de ces domaines peuvent être calculées à partir de différentes méthodes comme vu dans l'état de l'art. Nous avons utilisé deux méthodes, celle de l'enveloppe convexe minimale et celle de l'estimation par enveloppes convexes locales. Scull *et al.* (2012) insistent sur le fait de choisir une méthode d'estimation adaptée en fonction des objectifs de recherche. Par exemple, pour identifier le cœur du domaine vital, la méthode par enveloppes convexes locales qui se rapproche de l'estimation par noyaux est intéressante car elle permet de différencier les intensités d'utilisation de l'espace. Ce cœur est estimé généralement à 50 % du domaine vital (Marchandeau *et al.*, 2007). Dans Klein & Hamann (1999), la zone d'utilisation principale des cerfs à La Petite Pierre est estimée autour de 10 % en surface du domaine de vie annuel, ce qui est donc peu et ce qui signifie que les déplacements longs sont relativement rares. Dans ce même article, les domaines annuels sont estimés autour de 2500 ha. Nous avons trouvé des espaces parcourus au quotidien sur environ 65 ha. Pour évaluer les possibilités de déplacements hors du cœur du domaine vital qui peuvent entraîner des conflits avec des activités humaines, il est pertinent d'utiliser l'enveloppe convexe minimale qui a tendance à surestimer la surface du domaine. Nous avons vu que la pertinence de la méthode dépend aussi de la fréquence temporelle des points. Nous avons comparé les domaines vitaux des individus de différentes espèces en estimant la surface par les deux méthodes mentionnées. L'estimation par enveloppes convexes locales a tendance à sous-estimer les espaces parcourus. Cette méthode semble moins adaptée si l'on souhaite identifier des éléments du paysage potentiellement rencontrés lors des déplacements sur de longues distances en dehors des espaces de vie habituels. Or, c'est au cours des déplacements longs que les individus sont les plus amenés à rencontrer des obstacles importants comme de grandes infrastructures, obstacles dont ils se tiennent éloignés lors de leurs déplacements quotidiens.

3.1.2. Les rythmes de déplacements

La construction d'une trajectoire continue est une modélisation des déplacements par un choix d'interpolation du chemin entre deux points connus. Nous avons choisi d'interpoler les trajectoires en rejoignant linéairement deux localisations se suivant chronologiquement. Cette

interpolation est effectuée pour les données avec une fréquence temporelle élevée comme dans le cas des données GPS où les intervalles de temps sont compris entre 5 minutes et 6 heures. Pour les données VHF, les localisations sont prises en compte chronologiquement mais ne sont pas interpolées en une trajectoire. Celles-ci ont été utilisées afin d'estimer les domaines vitaux énoncés précédemment. L'interpolation linéaire des localisations GPS nous a permis de visualiser facilement l'ordre des localisations et les directions de déplacements. Nous avons créé des trajectoires spatio-temporelles pour lesquelles le temps est considéré. Dans la littérature, ce type de trajectoires sert souvent de support pour l'analyse des déplacements et pour une visualisation dynamique, par exemple, dans les travaux sur la mobilité des personnes (Imbert *et al.*, 2009) ou sur la caractérisation des trajectoires d'animaux (Calenge *et al.*, 2009). L'interpolation linéaire a l'avantage de ne pas introduire de choix a priori sur l'appréhension de l'espace par les individus et sur ce qu'ils évitent ou empruntent préférentiellement. Par contre, elle est forcément fausse et il faut considérer que toutes les trajectoires construites ont une part d'imprécision géométrique. Cette imprécision est d'ailleurs plus forte aux coordonnées de la trajectoire éloignées des localisations connues qu'à leur proximité. Nous avons caractérisé les trajectoires par des indices géométriques. Tablado *et al.* (2010) utilisent les critères de vitesse, de vitesse angulaire et de distance d'éloignement à un point d'origine afin de comparer les déplacements de trois espèces d'ongulés. Les valeurs obtenues sont mises en relation avec le comportement alimentaire des espèces. Par exemple, plus une espèce est sélective plus elle a tendance à se déplacer loin pour s'alimenter. Calenge *et al.* (2009) classent les trajectoires selon les distances entre les localisations d'intervalles de temps égaux ainsi que les angles relatifs entre les directions successives. Les distributions des valeurs de distances et des angles relatifs entre les localisations successives séparées par une fréquence temporelle régulière sont souvent caractérisées afin de constituer des modèles théoriques de déplacement. Ces distributions sont intégrées dans les simulations de déplacement par le modèle brownien ou de Lévy (Bartumeus *et al.*, 2005). La distribution théorique est comparée avec le modèle. L'explication des différences constatées entre théorie et observations fait l'objet de recherches. Les écarts peuvent être attribués à des interactions sociales ou encore à la présence d'éléments particuliers du paysage. Il est possible qu'il y ait des phénomènes d'autocorrélation lors des analyses de déplacements comme souligné par Dray *et al.* (2010). Les auteurs définissent l'autocorrélation comme une conséquence de plusieurs paramètres qui rend les valeurs estimées à partir de localisations proches temporellement ou spatialement plus similaires ou au contraire moins similaires qu'elles ne le seraient par une distribution aléatoire. L'identification de l'autocorrélation aide à comprendre le comportement des animaux car ceux-ci adaptent leurs déplacements à leur environnement et à leurs besoins. Un individu peut par exemple effectuer des déplacements dans un même endroit car un intérêt s'y trouve. Dans notre étude, nous n'avions pas suffisamment de données pour construire un modèle théorique en dehors de la seule espèce des chevreuils à Aurignac. Nous avons préféré utiliser des estimations de vitesses car les intervalles de temps étaient trop irréguliers. Nous avons calculé les distances à partir de la trajectoire linéaire pour une estimation des trajets sur longue durée par rapport aux intervalles de temps des enregistrements afin de réduire le biais induit par les échecs de positionnement. Les résultats nous ont permis d'estimer les vitesses limites et moyennes par espèce. Pendant 24 h, la répartition des vitesses est différente avec plus de déplacements rapides et sur de plus longues distances pour les renards et les cerfs que pour les chevreuils de manière générale.

En plus du calcul des vitesses, la chronologie des localisations est intéressante afin d'identifier le type de déplacement et les activités des animaux. Pour étudier les activités, certains colliers GPS sont équipés de capteurs indiquant entre autres la vitesse estimée en temps réel. Un détecteur de mouvements verticaux et horizontaux permet de déterminer si la tête de l'animal est relevée

ou baissée. Des indices d'activité sont calculés et ils sont associés à des phases de repos, de déplacement ou d'alimentation (Pouliot *et al.*, 2004). Nous n'avions pas ce type d'informations. Les différences de valeurs entre les altitudes données par le GPS et celles du MNT aux coordonnées planimétriques correspondantes sont trop importantes pour estimer si le collier GPS, donc la tête de l'animal, est situé près du sol (cela peut signifier une position couchée ou une consommation de plantes basses) ou s'il est situé en hauteur (déplacement ou consommation d'essences végétales hautes). Nous nous sommes appuyée sur les vitesses estimées et nous avons exploité l'approche des séries temporelles afin d'étudier les phases de repos et de déplacement. La représentation des séries temporelles est utilisée pour étudier les périodicités de certains phénomènes. Par exemple, dans Cantat (2004), les séries temporelles sur des températures sont analysées pour caractériser le phénomène d'îlot de chaleur selon les conditions météorologiques saisonnières et selon l'heure de la journée. Les rythmes de déplacements de faune sont caractérisés par cette même approche dans Girard *et al.* (2009). Les auteurs représentent la moyenne des distances estimées à partir de localisations en fonction de la période de la journée et en fonction de la période de l'année. Cela permet de segmenter les trajectoires. Dans nos cas d'étude, cette méthode est intéressante pour les cervidés dont les phases d'activité ne sont pas évidentes à distinguer car les vitesses de déplacement sont moins variables que chez les renards. Pour les renards, la distinction est nette entre une activité et des déplacements faibles la journée et des déplacements importants la nuit. Pour les cervidés, les phases d'activité et d'inactivité restent cependant difficiles à identifier car les valeurs sont très variables sur de courts laps de temps, même avec le lissage par les moyennes mobiles. Pour préciser les lieux de fréquentation comme dans Buard (2011), nous avons segmenté également les trajectoires en pauses et déplacements rapides d'après des seuils de distance, de durée totale et de vitesse. Un lieu de pause est un lieu restreint, parcouru pendant une certaine durée avec des vitesses de déplacement sont faibles. C'est une méthode que l'on retrouve dans Gottardi (2011) sur les chevreuils. La détermination des seuils de vitesse maximale dépend des espèces. Nous avons en fait exploité le critère de distance maximale entre les points et de durée minimale afin d'extraire des lieux de pauses ainsi que des lieux d'arrêts plus courts lors de déplacements de recherche fourragère, c'est-à-dire vers des lieux motivant les déplacements. Pour les renards en milieu périurbain, les distances parcourues et la description de l'espace nous permettent d'expliquer en partie les lieux de fréquentation : une zone arborée particulière, un espace vert, la proximité d'un bâtiment. Pour les cervidés en milieu forestier, l'information sur les peuplements forestiers principaux nous a permis de mettre en relation l'intensité de fréquentation et les caractéristiques de l'espace, même si nous ne pouvons connaître quelle essence précise est exploitée à une échelle locale.

Concernant la compréhension des différences de comportement entre les individus, il est délicat de mettre en relation les caractéristiques individuelles comme l'âge ou le sexe avec les distances et les espaces parcourus. Pour l'échantillon sur les chevreuils à Aurignac, il est possible de distinguer facilement les classes d'âge car seuls les juvéniles ont des déplacements de dispersion définitive loin de leur domaine d'origine. Les adultes ont des déplacements qui peuvent s'effectuer sur plusieurs kilomètres mais qui sont temporaires. Pour la taille des domaines vitaux, nous n'avons pas relevé de différences notables d'étendue entre les mâles et les femelles. Mysterud (1999) met en évidence que les femelles chevreuil ont tendance à davantage migrer loin de leur lieu de naissance que les mâles. L'emprise des espaces parcourus dépend de la période de l'année, moins grande pour les femelles que pour les mâles à la période des naissances par exemple, et de facteurs environnementaux comme la qualité de l'habitat (Saïd & Servanty, 2005 ; Rossi *et al.*, 2001). Toujours pour le chevreuil dans Arbouet (2006), les domaines vitaux des femelles sont en moyenne plus petits que ceux des mâles mais chaque genre présente

des variabilités. Par contre individuellement, ils restent stables au cours d'une vie. À partir des quelques journées de suivis des cervidés dans les Vosges, nous retrouvons des valeurs similaires pour l'aire parcourue même si la comparaison est difficile car les sites d'étude sont différents de ceux décrits dans la littérature. Nous trouvons en moyenne 50 ha pour les enveloppes convexes des localisations de chevreuils et 250 ha pour les cerfs. Dans Saïd & Servanty (2005), l'aire des domaines vitaux par la méthode des noyaux est estimée à 25 ha avec des variations interindividuelles entre 15 et 35 ha pour les femelles en forêt de Chizé (dans la région Poitou-Charentes). Hamann *et al.* (1997) trouvent que l'espace parcouru des biches à La Petite Pierre, donc sur la même zone d'étude que dans notre cas, varie entre 450 et 2000 ha pendant environ une année mais que la zone de vie principale comprend entre 75 et 200 ha. Les valeurs que nous obtenons sont plus de l'ordre de grandeur du cœur des domaines de vie mais nous ne pouvons pas conclure sur le fait que l'emplacement de ce cœur correspond aux journées de suivis de l'échantillon. Cela nous permet cependant de connaître les distances habituellement parcourues pendant une journée. Pour l'estimation des distances, les différentes fréquences d'enregistrement sur les chevreuils à Aurignac mettent en évidence l'influence de l'échantillonnage sur les résultats. Par exemple sur une année, les distances estimées à partir des intervalles de temps de 6 h sont plus petites que celles estimées à partir des distances journalières. En effet, la distance estimée sur une journée pour un individu peut varier entre 1 km à partir des fréquences de 6 heures, à 2 km à partir de celles de 1 heure et enfin à 10 km pour celles de 10 minutes. Pour la fréquence la plus grande de 10 minutes, la moyenne des distances entre les localisations pour l'échantillon de 2008 est de 55 mètres alors que pour l'intervalle de 6 heures elle est de 255 mètres.
Les interactions entre les individus sont étudiées à l'aide des distances entre leurs localisations aux mêmes moments. Ces distances entre individus sont utilisées par exemple par Schmidt *et al.* (2009) entre deux espèces différentes et par Gottardi (2011) pour une même espèce. Les rencontres identifiées correspondent majoritairement à des relations entre jeunes et adultes pour les chevreuils et au comportement grégaire des biches. Le partage de l'espace entre chevreuils et cerfs est constaté dans l'échantillon de La Petite Pierre mais les distances restent le plus souvent grandes entre les deux espèces, ce qui ne permet pas de caractériser la réponse des individus à la présence de l'autre espèce.

L'étude des localisations seules nous a permis de déterminer ce que l'on pouvait étudier à partir des enregistrements obtenus par télémétrie. La plupart des échantillons correspondent à des observations pendant des durées journalières. Pour la considération des différences entre les espèces, c'est donc le rythme quotidien que nous avons pu comparer. Les échantillons nous ont aussi permis de mettre en évidence des comportements particuliers, par exemple des déplacements exceptionnels en dehors de l'espace parcouru habituellement. Il reste que la caractérisation des déplacements dépend de l'échantillon (fréquence, durée, période de l'année) et qu'elle doit être modérée selon les comportements individuels et les milieux des sites d'étude.

3.2. La caractérisation des éléments du paysage influençant les déplacements

Nous avons cherché à déterminer l'influence des éléments du paysage sur les déplacements des animaux en fonction de leur espèce. La prise en compte du contexte des cas d'étude est essentielle car les caractéristiques des sites interviennent dans les choix de déplacements. Nous avons dans un premier temps regardé la situation des animaux par rapport aux éléments du paysage afin de connaître leur proximité ou leur éloignement vis-à-vis de certaines occupations du sol. Nous avons ensuite utilisé les traces linéaires afin d'estimer les chemins empruntés (la

trace est l'objet linéaire et la trajectoire est la trace caractérisée avec le temps). Nous avons tenté d'identifier des lieux de passage et des obstacles aux déplacements. Les analyses et leurs résultats dépendent aussi des données de description de l'espace qui ne représentent qu'une partie de l'environnement dans lequel évoluent les animaux. Nous avons privilégié l'étude des déplacements individuels permettant de dire qu'un type de comportement existe chez l'espèce correspondante. La chronologie des collaborations avec les écologues et du partage des traces GPS ont influencé cette démarche, les premiers échantillons concernant quelques individus sur des périodes courtes.

3.2.1. La caractérisation des préférences spatiales

Nous avons analysé les relations spatio-temporelles entre les données de localisations des animaux et les données de description des éléments du paysage. Nous revenons sur les méthodes d'analyses proposées et sur les hypothèses de préférences spatiales que nous avons formulées. Nous nous sommes d'abord posé la question de la définition d'une préférence spatiale. Pour pouvoir nommer la fréquentation d'un lieu comme préférentielle, il faut que sa présence soit davantage remarquée dans ce lieu par rapport à la disponibilité des éléments du paysage. Cela peut s'effectuer en analysant le voisinage proche des localisations connues et en le comparant avec celui éloigné. Cependant, la limite entre préférence et opportunisme dû à la présence d'un élément du paysage est difficile à déterminer. Pour l'exemple de l'influence de la pente sur les cervidés dans les Vosges, nous avons émis l'hypothèse que les chevreuils fréquentent préférentiellement les pentes faibles car les pentes sont en moyenne plus importantes sur le site d'étude et dans les espaces parcourus que dans un voisinage proche des localisations. Cette préférence est pourtant difficile à qualifier car les chevreuils sont également présents sur des pentes plus élevées. Pour déterminer les relations entre déplacements et espace, nous avons pris en compte le voisinage des localisations ponctuelles ainsi que celui des trajectoires spatio-temporelles. Nous avons ensuite proposé une méthode de validation statistique qui décompose le site d'étude en cellules d'une grille régulière et qui compare les cellules avec localisations et les cellules sans.

La caractérisation de l'espace autour des localisations et des trajectoires reconstruites d'animaux de différentes espèces est une approche décrite dans la littérature. Dans Dickson & Beier (2007), une zone tampon est construite autour des trajectoires afin de prendre en compte l'incertitude des localisations. Les auteurs comparent la composition paysagère – relief et végétation – entre cette zone tampon et celle du domaine vital afin de dégager des préférences au niveau des déplacements de lynx. Nous avons effectué dans un premier temps cette même comparaison entre les domaines vitaux et les sites d'étude puis entre le voisinage des localisations et les domaines vitaux. Cela a donné une caractérisation des domaines de vie intéressante pour les renards en milieu périurbain. Le résultat, à savoir que les renards suivis se situent majoritairement à l'écart des centres-villes et près des espaces verts, est validé par la littérature. Cela reste dans notre cas des échantillons et il ne s'agit pas de recensements de la population de renards sur un espace. Les préférences de fréquentation demeurant individuelles. La comparaison entre la composition du site d'étude et des domaines vitaux – ou des espaces parcourus –, et celle entre la composition des domaines vitaux et le voisinage des traces sont à nuancer. Selon l'emprise du site d'étude considéré, par exemple sur l'ensemble d'une agglomération urbaine, et selon la surestimation de l'espace parcouru, ces sites peuvent être vastes et divers en éléments du paysage.

La recherche de lieux d'intérêt lors des déplacements s'appuie sur une analyse des fréquences et des durées de fréquentation des lieux caractérisés. Nous avons vu dans le chapitre I que c'est une méthode employée lors des déplacements quotidiens de personnes. Pour analyser le voisinage des déplacements, nous pouvons citer les méthodes d'analyses du contexte spatial proposées dans Calenge *et al.* (2009) : des distances aux éléments du paysage sont calculées comme la distance aux chemins ou la distance aux forêts. Les auteurs ont développé le package *itraj* dans le logiciel R dans ce but. Les fonctions permettent de reconstruire des trajectoires et d'en étudier les propriétés et les relations avec une description de l'espace. Buard (2013) propose de caractériser des stations de pause dans les déplacements en fonction de la proximité à certains éléments du paysage : point d'eau, zone de végétation. Pellerin (2005) caractérise les « unités paysagères » autour des déplacements en utilisant la méthode du Temps de Premier Passage[6]. Dans notre mise en œuvre, nous avons d'abord regardé le voisinage des traces linéaires puis nous avons ajouté une distinction entre les périodes de temps qui influencent le rythme et le type de déplacements. Nous souhaitions analyser les déplacements de manière prospective et éviter de regrouper dans un premier temps les informations afin de pouvoir garder l'ensemble des informations disponibles. C'est pour cela que nous avons représenté en fonction du temps les distances aux différents éléments du paysage : cela nous a permis de voir la progression des déplacements individuels dans un contexte spatial. Dans un second temps, nous avons calculé la composition moyenne en éléments du paysage autour de toutes les localisations d'un individu, et cela le long d'un gradient de distance du voisinage considéré. Cela fait perdre de l'information au niveau des localisations mais permet de mettre en évidence des tendances dans l'utilisation de l'espace par les animaux. Certains résultats peuvent sembler logiques comme la présence des renards dans les zones de végétation en milieu urbain ou la situation des chevreuils et des cerfs sur les pentes faibles en zone vallonnée. Certaines observations sur les animaux peuvent être plus surprenantes. Par exemple dans Marsh *et al.* (2005), les salamandres ont tendance à être freinées par les pentes davantage en sens descendant qu'ascendant. Nos résultats d'analyses descriptives permettent de formuler des hypothèses plus ou moins probables en fonction de la caractérisation de préférences plus ou moins prononcées. Par exemple, la fréquentation préférentielle des zones de feuillus par les cervidés par rapport à celles de conifères est remarquée mais elle peut paraître peu significative étant donné que les forêts de résineux n'occupent que 20 % du site d'étude. Les observations sur les renards à Nancy illustrent bien les différences dues au contexte spatial propre à chaque individu. Le renard vivant en limite d'agglomération n'occupe pas les mêmes occupations du sol que les trois autres dans un tissu urbain plus dense. La proximité des bâtiments constitue par exemple une différence car le renard observé loin du noyau urbain ne s'en approche qu'en période nocturne. On retrouve toutefois de nombreuses similitudes entre les renards vivant dans des milieux variables : la station dans des gîtes de repos diurnes, de longs déplacements nocturnes, une proximité aux zones arborées.

La recherche de corrélations entre les déplacements et l'espace s'effectue souvent par des approches statistiques. Cette recherche peut être effectuée entre des variables quantitatives afin de déterminer si les relations sont significatives. Plusieurs méthodes existent comme le test du Khi² permettant d'évaluer l'indépendance des variables ou le coefficient de corrélation de Bravais-Pearson s'appuyant sur la covariance. En écologie, de nombreux travaux utilisent des tests statistiques afin de valider le rôle explicatif de certaines variables environnementales par rapport à d'autres, par exemple les tests d'analyses de vraisemblance (ANOVA) ou les analyses

[6] Le Temps de Premier Passage calcule le temps mis par un individu à partir d'une localisation pour traverser un cercle fictif d'un rayon défini. Lors de l'analyse de trajectoires d'animaux, ces cercles sont appliqués à chaque localisation connue. La variation de son rayon permet d'identifier des zones de recherches privilégiées.

factorielles. Ces test correspondent à une sélection de variables potentiellement explicatives, par exemple des variables de l'animal ou des variables spatiales et environnementales au sens large comme la période de l'année ou le type de végétation pouvant expliquer la présence de faune. Le critère d'Akaike peut ensuite être utilisé afin de tester la vraisemblance de plusieurs modèles et de déterminer celui le mieux adapté aux observations (Richard *et al.*, 2010 ; Cobben *et al.*, 2009). Ce critère évalue en fait des combinaisons de paramètres pour identifier le modèle le plus probable. Ces approches sont dans notre cas peu appropriées vu le faible nombre d'individus. Nous avons par contre proposé une approche statistique à partir des localisations des individus suivis. Le nombre de localisations est en effet suffisant pour obtenir des résultats significatifs. Nous avons caractérisé les sites d'étude selon une grille de pas régulier avec les variables de description de l'espace et le nombre de localisations des animaux. Le test de Mann-Whitney nous a permis d'identifier les variables spatiales significativement différentes dans les cellules avec localisations par rapport aux cellules sans. Grâce à la comparaison des valeurs moyennes, nous pouvons reconnaître des préférences ou des évitements de la part des animaux. Afin de préciser l'importance de la présence en élément du paysage selon le type de déplacement, nous avons constitué des classes afin de mener un test du Khi². Les deux tests statistiques nous ont permis de confirmer les résultats d'analyses descriptives précédentes entre le voisinage proche des localisations ou des traces par rapport à un voisinage plus lointain. Les résultats ont été particulièrement significatifs dans le cas d'étude des cervidés dans les Vosges avec une préférence marquée des espèces pour les pentes faibles et le parcours privilégié de certaines essences forestières de feuillus. Pour les renards en milieu périurbain à Nancy, l'analyse s'est effectuée individuellement car les quatre individus vivent dans des sites correspondant à un gradient d'urbanisation. Les résultats sont un peu moins significatifs que dans le cas d'étude des Vosges. Cependant leur interprétation correspond aux résultats d'analyses descriptives tout en les modérant. Par exemple, la préférence pour les zones arborées lors des déplacements nocturnes des renards n'est pas aussi marquée que ce que l'on avait pu supposer. Par contre, le parcours préférentiel de lieux particuliers comme des zones d'activités – espaces verts, zones commerciales, campus – également indiqué dans Rosatte & Allan (2009), est confirmé dans les résultats obtenus par les traitements statistiques.

3.2.2. Les chemins empruntés par les animaux

L'interrogation sur les chemins empruntés et les lieux de passage rejoint l'identification de préférences spatiales dans le cas des localisations à grande fréquence temporelle. Les chemins sont estimés à partir des traces et l'étude du voisinage de ces traces permet de calculer des intersections avec les éléments du paysage. Les traces linéaires ont d'abord été considérées comme étant les plus proches des chemins réels. Des zones tampon sont ensuite créées autour des trajectoires. Ces zones peuvent être vues selon la probabilité que les animaux ont de les emprunter entre les localisations. Plus la zone tampon est large, plus il y a de chances que son chemin réel soit contenu dans cette zone. L'approximation est visible lorsque les traces linéaires croisent des bâtiments ou d'autres constructions hermétiques. Lorsque que la trace croise une route, nous ne savons pas exactement à quel niveau la traversée a eu lieu. C'est pour cela que nous avons utilisé le graphe dual de préférence à celui des routes topologiques pour estimer le nombre de traversées minimales. Pour les cervidés dans les Vosges, l'étude des chemins avait surtout pour objectif de confirmer des préférences spatiales ou des évitements vis-à-vis des caractères de l'espace. Le milieu forestier contient peu d'obstacles physiques décrits dans les bases de données et qui soient donc possible à identifier par des analyses spatiales. Pour les renards périurbains, les espaces parcourus présentent une densité élevée de bâtiments et de routes. Les individus sont toujours à proximité d'infrastructures humaines. Nous avons

représenté les pourcentages de couverture de végétation en fonction du rayon de voisinage considéré autour des localisations. Pour étudier l'évolution de la composition paysagère autour des localisations, nous pouvons aussi les représenter en fonction de la surface de voisinage. Ceci entraîne juste une diminution plus rapide de la couverture végétale autour des localisations, la surface augmentant plus vite que le rayon. Il a été possible de relever des préférences spatiales en fonction d'associations entre éléments du paysage. Par exemple, des zones arborées peuvent favoriser la station ou le passage d'un animal même à proximité d'une maison ou d'une route, comportements observés dans le cas des renards en milieu périurbain et des chevreuils en milieu agricole. L'étude des trajectoires par rapport aux éléments du paysage sous-entend aussi une approximation. Nous avons calculé des moyennes sur les longueurs des traces incluses dans des zones arborées et la distance moyenne entre la trace et les constructions. Les résultats varient entre l'analyse des traces et celle des localisations. Par exemple dans le cas des chevreuils dans les Vosges, les valeurs de pentes sont plus faibles autour des localisations qu'autour des traces. Il reste cependant difficile de conclure sur des moyennes car la variabilité est grande entre les segments de la trace : pour les 200 segments de la trace journalière d'un renard à Nancy, la moyenne d'inclusion des segments dans des zones arborées est de 46 % avec un écart-type de 29 %. L'étude de l'espace inter-localisations met par contre nettement en évidence la distinction entre les activités selon la période de la journée par un nombre de traversées de routes plus importants la nuit. Nous avons proposé une méthode de validation statistique pour déterminer si les voies de communication et les voies ferrées jouaient un rôle d'obstacle. Nous avons extrait les voies selon leur type dans un voisinage proche des trajectoires (rayons de 10 m, 20 m et 50 m). Parmi ces voies, celles traversées sont mises en perspective de celles qui ne le sont pas. Cette méthode permet de préciser le rôle des voies ferrées sur les déplacements. Les renards ont une préférence notable pour se situer dans leur voisinage. Cette préférence est observée surtout lors de déplacements par Kolb (1984) et Trewhella & Harris (1990) : les alentours de voies ferrées peuvent avoir un rôle de corridor utilisé par les renards. Par contre, nos résultats indiquent que les renards longent les voies ferrées mais qu'ils les traversent significativement peu. Pour les routes à une chaussée correspondant souvent à un trafic moyen et qui sont les plus nombreuses sur le site de Nancy, le nombre de voies traversées est significativement plus petit que le nombre de voies à proximité. Ce constat associé à un évitement général des routes peut indiquer un effet de barrière que ce soit pour le dérangement que pour le danger que le trafic représente (Conruyt-Rogeon & Girardet, 2012).

Nous avons vu que l'étude de l'espace entre les localisations mettait en évidence des traversées des réseaux – transport routier et ferré, hydrographie – en tenant compte de la topologie des éléments du paysage. Le sens de direction des traces est introduit dans Dickson *et al.* (2007) dans le but de déterminer si des éléments du paysage influencent les choix de parcours. Nous n'avons pas séparé l'espace selon les directions dans les analyses. Les distances entre les points nous ont paru trop grandes pour déterminer une valeur seuil d'angle directionnel d'ouverture à prendre en compte et à comparer avec le reste des directions. Nous avons introduit la notion d'influence du paysage dans les choix de chemins estimés par la trace en prenant en compte la vitesse avant et après une localisation connue et les angles relatifs entre les segments de la trace. Nous avons mis en parallèle ces valeurs avec la composition de l'espace autour de chaque localisation. Cette recherche automatique des causes spatiales à des changements de direction ne donne pas de résultats probants. Étant donné la fréquence temporelle et la précision spatiale des points GPS, la détection automatique d'évitement ou d'attraction d'éléments du paysage lors des déplacements n'est pas évidente. De la même manière, la détection des endroits précis des traversées n'est pas possible. La reconnaissance par lecture des enregistrements reste cependant possible, comme nous l'avons illustré par des exemples, comme des chevreuils

longeant des chemins. La caractérisation automatique des lieux favorables aux déplacements concerne davantage des préférences spatiales que l'identification des lieux de passages et des obstacles.

3.2.3. L'appréhension de l'espace par les animaux lors des différents types de déplacements et l'apport de l'analyse paysagère

Nous avons principalement étudié des déplacements quotidiens sauf dans le cas d'étude des chevreuils à Aurignac qui réalisent des déplacements en dehors du domaine vital habituel. Les réflexions en aménagement du territoire doivent prendre en compte non seulement l'espace fonctionnel des espèces dans leur habitat quotidien mais également répondre à des besoins plus exceptionnels sur de plus longues distances (besoin de migration définitive pour changer de domaines de vie, migration temporaire de reproduction). Nous revenons sur cette problématique en abordant les trajectoires connues des animaux selon le type de déplacement puis en menant une analyse paysagère. L'analyse paysagère s'appuie sur des indices qui décrivent la composition en éléments du paysage et surtout leur configuration les uns par rapport aux autres. Elle permet de caractériser des propriétés comme la connectivité entre des taches d'habitat et l'isolement de certaines occupations du sol favorables aux espèces animales. Nous prenons l'exemple du site des Vosges afin de mettre en perspective les résultats d'analyses des trajectoires avec une approche paysagère.

Les deux types de déplacements : quotidien et exceptionnel

La question se pose de la différenciation entre l'appréhension de l'espace parcouru quotidiennement et connue par les animaux et celle d'un espace inconnu pratiqué lors de déplacements uniques. Nous avons posé l'hypothèse que les animaux ont tendance à conserver des préférences spatiales dans les déplacements quotidiens comme lors de déplacements plus exceptionnels. Chez les renards, les déplacements longs, de quelques kilomètres, ne sont pas rares et il semble que les lieux visités soient similaires d'une journée sur l'autre. Les observations de déplacements longs chez les chevreuils ont permis de relever des traversées de routes avec un trafic important ainsi que l'effet de barrière des autoroutes. Les routes peuvent être peu ou pas présentes dans le cœur du domaine vital mais être traversées lors d'excursions temporaires ou lors de dispersions définitives. L'effet de barrière des grandes infrastructures linéaires comme les grands fleuves est aussi montré dans Cosson *et al.* (2006). Il apparaît un lien entre le nombre d'excursions sur de longues distances et le type d'habitat. Les chevreuils semblent se restreindre à de plus petits espaces de vie en milieu forestier, ce qui est observé à La Petite Pierre et à Aurignac. La taille des domaines vitaux est influencée par les ressources mais aussi par d'autres paramètres comme la densité de population. Le concept de distribution libre idéale est un principe en écologie qui relie le nombre d'individus et la disponibilité des ressources alimentaires (Fretwell & Lucas, 1970, dans Saïd & Servanty, 2005). La quantité et la qualité des ressources jouent un rôle dans l'emprise des espaces parcourus. Ces sont des aspects qui motivent des déplacements en dehors du domaine de vie même si nous ne les avons pas intégrés dans nos analyses. La comparaison entre les deux sites d'étude sur les chevreuils permet d'observer la diversité des comportements. Le parcours de la RNCFS en milieu forestier n'est pas le même que celui d'une mosaïque de cultures et de zones arborées fragmentées. Les passages entre les forêts et les cultures sont observés à Aurignac alors que cela n'est pas le cas dans la RNCFS. Les déplacements entre les types d'occupation du sol en milieu hétérogène sont intéressants à prendre en compte lors de la mise en place d'aménagements. Morellet & Goulard (2010) ont montré que les passages des forêts vers les milieux ouverts (prairies et cultures) sont plus fréquents pendant la nuit et au printemps, saison où la végétation y est plus intéressante.

Le couvert arboré est utilisé comme une protection contre les dangers et les dérangements. Dans tous les cas d'étude, la végétation joue un rôle important. Les renards exploitent des parcs, des bois urbains, des jardins ainsi qu'un cimetière à Nancy. Dans les Vosges, la distinction des peuplements forestiers présents dans les espaces parcourus nous a permis de montrer des tendances, même si des informations plus détaillées aideraient à affiner les préférences en types d'essences et en taux de couvert.

Nous avons caractérisé la structure de la végétation car la littérature indique une utilisation des structures linéaires. Cette utilisation a potentiellement lieu lors des déplacements quotidiens et lors de longs déplacements plus exceptionnels. Nous avons distingué les haies et les bosquets des autres zones arborées. Nous nous attendions à une fréquentation marquée des haies par les renards mais nous n'avons pas obtenu de résultats concluants avec nos analyses de voisinage. Les individus utilisent tous les types de végétation arborée et non préférentiellement les structures linéaires. Cela est lié au type de milieu. Dans le cas des renards en milieu périurbain et des cervidés en milieu forestier, les sites d'étude contenaient peu ou pas de haies. L'utilisation des haies par les petits carnivores est remarquée en milieu agricole et forestier fragmenté (Pereboom, 2006 ; Note & Poix, 2006). Sur la zone agricole à bois fragmentés, une perspective serait de mener des analyses statistiques pour identifier ou non une utilisation préférentielle des structures linéaires par les chevreuils. Dans Cargnelutti (2007), l'hypothèse est en effet émise que les haies sont utilisées non pas uniquement lors de déplacements mais aussi comme un habitat de substitution au bois.

Les différences individuelles interviennent dans la détermination des domaines vitaux et dans les déplacements exceptionnels. Les connaissances bibliographiques sur les comportements des espèces animales permettent de relativiser la particularité de certains déplacements individuels. Les individus ont leur propre personnalité qui peut jouer un rôle, même s'ils répondent aux besoins généraux de leur espèce (Bonnot *et al.*, 2012 [1] ; Burger *et al.*, 2009). Pour les trois cerfs suivis dans les Vosges, deux se suivent, ce qui limite la variation interindividuelle. Les enregistrements permettent d'observer des parcours similaires comme lors de longs déplacements sur des zones de plus de 100 m de dénivelé. Le troisième cerf est par contre observé dans un espace avec des caractéristiques différentes. L'aide des écologues travaillant sur les espèces et plus précisément sur les cas d'étude dont sont issus les échantillons nous a permis de compléter et de confirmer l'interprétation des analyses de données.

L'analyse paysagère du site des Vosges

Nous souhaitons dans cette partie élargir les résultats obtenus sur les préférences spatiales des animaux à une approche paysagère. L'approche paysagère utilise des connaissances sur les comportements des animaux. Dans l'étude de l'espace fonctionnel des espèces animales, cette analyse est intéressante car elle permet d'estimer les lieux potentiellement parcourus par les animaux sans nécessiter de suivis par télémétrie des individus.
Nous prenons l'exemple des cervidés dans les Vosges. Nous synthétisons les caractères de l'espace qui ont une influence sur les déplacements des chevreuils et des cerfs. L'analyse paysagère a pour but d'obtenir une lecture de l'espace en fonction des variables influençant les déplacements. Nous nous sommes concentrée sur deux variables qui jouent un rôle significatif sur les déplacements des deux espèces : la pente et le type de peuplement forestier. Nous avons combiné les classes de valeurs de ces deux variables :

- Les valeurs de pente sont réparties en 5 classes avec les intervalles suivants en degré : pente très faible entre [0 ; 5[, faible entre [5 ; 10[, moyenne entre [10 ; 15[, forte entre [15 ; 20[, très forte entre [20 ; 45[. Nous avons vu que les pentes utilisées par les chevreuils étaient

préférentiellement très faibles et les pentes par les cerfs faibles. Cette préférence est surtout valable pour les comportements de faible mobilité, les cervidés pouvant se déplacer sur des pentes fortes. Il s'agit de préférence d'habitat ;

- Les classes de la végétation sont celles de la couche unifiée de la BD TOPO® : {forêt fermée de conifères, forêt fermée de feuillus, forêt fermée mixte, bois, haie, autre}. Nous avons considéré cette base, et non la Carte Forestière, car les préférences pour la plupart des classes sont très marquées. La nomenclature de la BD TOPO® nous semble adaptée à l'emprise du site d'étude et permet une vision claire des types de peuplement sans être trop détaillée. La préférence des chevreuils et des cerfs est significative pour les feuillus alors que les conifères sont évités. Les peuplements mixtes sont plutôt préférés par les chevreuils alors qu'ils sont évités par les cerfs.

25 combinaisons sont possibles entre les classes pour la description de l'espace, étant donné que les superpositions entre certaines valeurs de pente et certains types de végétation n'existent pas. La carte est représentée en Figure III.65. Nous avons étendu la caractérisation des classes au-delà de la zone d'étude, sur l'ensemble du massif forestier au nord de l'autoroute A4 et jusqu'au nord de la route D919.

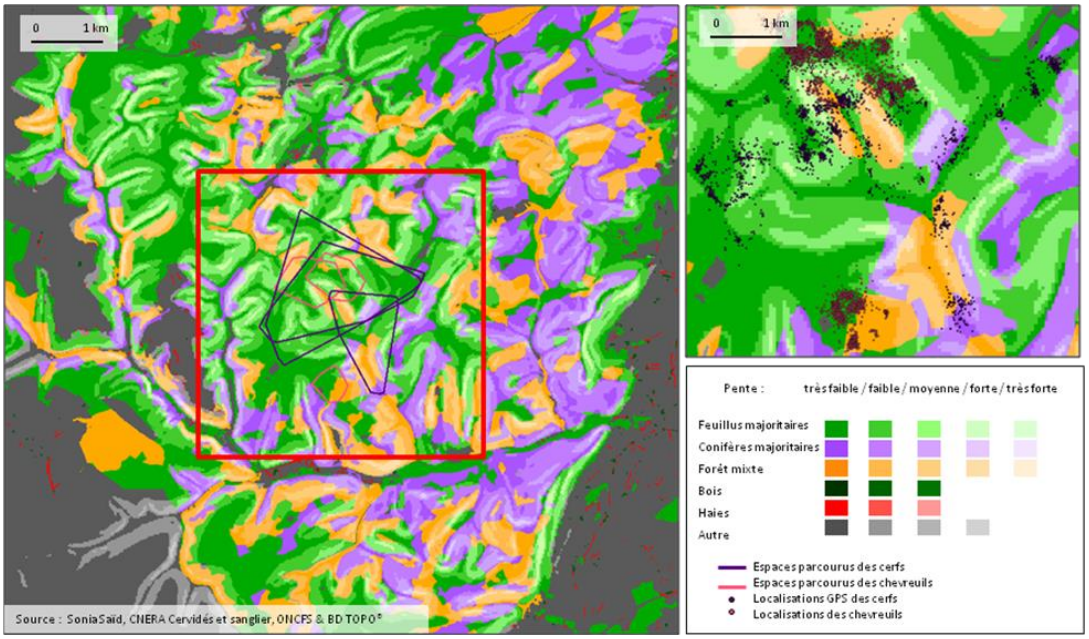


Figure III.65. Carte avec l'information combinée des pentes et des types de végétation. Celle-ci sert de base pour le calcul d'indice de paysage comme la connectivité entre les types d'occupation du sol. Entourée de rouge : la zone autour des localisations pour laquelle sont calculés les indices du paysage.

Nous reprenons une approche d'analyse paysagère afin d'évaluer la connectivité des occupations du sol a priori préférées par les cervidés et qui peut par extension favoriser les déplacements. Nous utilisons pour cela le logiciel Fragstats (Finder *et al.*, 1999). Celui-ci accepte en entrée un raster renseigné sur les valeurs de pente et les types de peuplement forestier. Des indices de caractérisation de l'occupation du sol sont calculés sur une aire de 25 km² comprenant les localisations des cervidés suivis. Les indices calculés peuvent concerner le niveau du paysage c'est-à-dire l'ensemble du site d'étude, le niveau des classes c'est-à-dire dans notre cas les 25 classes croisant la valeur de pente et le type de végétation, et enfin le niveau des patchs c'est-à-dire des parcelles caractérisées selon la classification. Nous nous concentrons sur les indices au niveau du paysage et des classes qui nous paraissaient les plus pertinents pour établir une caractérisation de l'habitat favorable.

Au niveau du paysage, l'indice de diversité de Simpson est de la forme : $1-\Sigma P_i^2$ avec P_i étant le pourcentage en surface occupée par une classe. Son intervalle de valeur est compris entre 0 et 1. Sur notre site, il est égal à 0,88, ce qui signifie que les patchs de différentes natures sont en proportion assez similaires. L'indice de diversité de Shannon est de la forme de : $-\Sigma(P_i \times \ln(P_i))$. Il est égal à 2,3 ce qui indique que les patchs d'occupations du sol différentes sont assez bien réparties sur le site d'étude. Cet indice est plus sensible aux petites classes (les haies et les bois), ce qui peut expliquer que la diversité du paysage semble moins grande que par l'indice de Simpson.

Au niveau des classes, nous avons calculé plusieurs indices qui caractérisent les patchs les constituant. Les indices s'appuient sur le calcul des périmètres, des aires et des distances entre les patchs. Ils sont présentés en Tableau III.21. Nous avons indiqué en rouge les classes qui sont a priori favorables à la présence des chevreuils et des cerfs. Il s'agit de classes correspondant à des pentes inférieures à 15° avec des peuplements de feuillus et mixtes (pour les forêts mixtes, l'évitement par les cerfs est significatif mais moins prononcé que pour les conifères). Les classes défavorables sont indiquées en bleu : elles correspondent aux pentes supérieures à 15° et aux divers peuplements. Les autres classes correspondent aux types de végétation moins représentés sur le site d'étude et non testés statistiquement.

Tableau III.21. Indices calculés sur les classes d'occupation du sol avec les informations sur les pentes et les types de peuplements forstiers. Les indices sont présentés dans un ordre décroissant des superficies.

classe	aire (ha)	% de surface	nombre de patchs	densité des patchs (nb/km²)	longueur des bordures (m)	densité des bordures par rapport à la surface (m/ha)	aire moyenne des patchs (ha)	aire médiane des patchs (ha)	proximité des patchs (m)	indice de similarité entre les patchs	indice sur la connectivité entre les patchs	indice sur la cohésion des patchs
pente très faible et foret fermée de feuillus	477,8	18,4	125	4,8	140975	54,3	3,8	0,5	27,7	400,1	0,8	95,3
pente faible et foret fermée de feuillus	476,6	18,4	186	7,2	211450	81,5	2,6	0,5	15,5	585,4	0,7	93,1
pente moyenne et foret fermée de feuillus	363,1	14,0	118	4,5	140075	54,0	3,1	0,5	14,9	454,7	1,4	92,2
pente faible et foret fermée de conifères	231,8	8,9	132	5,1	103050	39,7	1,8	0,4	4,3	448,5	0,8	89,2
pente faible et foret fermée mixte	229,9	8,9	143	5,5	114075	43,9	1,6	0,4	6,8	510,2	1,1	88,3
pente moyenne et foret fermée mixte	198,3	7,6	106	4,1	86725	33,4	1,9	0,4	4,8	297,2	1,4	88,7
pente moyenne et foret fermée de conifères	165,1	6,4	91	3,5	79475	30,6	1,8	0,6	5,8	358,8	1,4	87,7
pente très faible et foret fermée de conifères	112,1	4,3	83	3,2	54775	21,1	1,4	0,3	1,9	497,7	0,7	87,4
pente très faible et foret fermée mixte	105,8	4,1	92	3,5	55600	21,4	1,2	0,3	2,6	526,2	0,8	84,6
pente très faible et autre	80,2	3,1	62	2,4	37025	14,3	1,3	0,2	6,5	377,0	2,1	87,3
pente forte et foret fermée de feuillus	64,6	2,5	77	3,0	38175	14,7	0,8	0,4	0,7	320,0	0,6	79,1
pente forte et foret fermée de conifères	35,4	1,4	40	1,5	20675	8,0	0,9	0,6	0,4	207,1	0,6	79,1
pente forte et foret fermée mixte	33,2	1,3	37	1,4	20725	8,0	0,9	0,4	0,6	195,4	0,8	79,5
pente faible et autre	16,7	0,6	67	2,6	15400	5,9	0,2	0,1	0,4	197,1	1,1	61,7
pente très faible et haie	2,3	0,1	13	0,5	2600	1,0	0,2	0,1	0,1	118,0	5,1	48,1
pente moyenne et autre	1,2	0,0	16	0,6	1650	0,6	0,1	0,1	0,1	118,0	1,7	10,7
pente tres forte et foret fermée mixte	0,6	0,0	2	0,1	850	0,3	0,3	0,3	0,0	55,4	0,0	64,1
pente tres forte et foret fermée de feuillus	0,5	0,0	2	0,1	550	0,2	0,3	0,3	0,0	56,5	0,0	51,5
pente faible et haie	0,4	0,0	4	0,2	600	0,2	0,1	0,1	0,2	82,4	16,7	33,5
pente très faible et bois	0,2	0,0	2	0,1	250	0,1	0,1	0,1	0,0	64,4	0,0	20,0
pente moyenne et haie	0,1	0,0	1	0,0	100	0,0	0,1	0,1	0,0	93,0	0,0	0,0
pente forte et autre	0,1	0,0	1	0,0	100	0,0	0,1	0,1	0,0	31,5	0,0	0,0

défavorable **favorable** **non testée**

Ce qui ressort de ce tableau est que les classes correspondant à l'habitat le plus favorable des cervidés occupent les surfaces les plus importantes sur le site d'étude. Les feuillus en pente très faible et faible recouvrent chacune 18 % de la surface totale. Leurs nombres de patchs respectifs représentent 9 et 13 %. La densité des patchs donne une idée de la fragmentation d'une classe. Elle est inférieure pour les feuillus en pente très faible (4,8 par km²) que pour les feuillus en pente faible (7,2 par km²). Ces valeurs sont à interpréter en parallèle avec les longueurs de bordures, plus élevées dans la 2nde classe, et avec les aires des patchs, de médianes équivalentes mais supérieures en moyenne dans la 1ère classe. Ces indices nous permettent de dire que les patchs de forêts de feuillus sur pente très faible sont un peu moins fragmentés que sur pente faible, ce qui peut faciliter d'autant plus le déplacement sur les pentes très faibles. L'indice de proximité entre les patchs correspond à une distance moyenne entre les patchs. Cette distance est en fait plus grande pour la première classe (27 m) que pour la seconde (15 m) : les cervidés doivent traverser sur de plus longues distances d'autres classes pour atteindre les patchs de plus faibles pentes. Ces distances restent néanmoins petites. L'indice de connectivité entre les patchs d'une même classe est défini comme le pourcentage de liens fonctionnels entre les patches inférieurs à une distance seuil. Nous avons défini cette distance à 100 m qui est très facilement parcourue par un chevreuil ou un cerf en une journée. En dehors des classes « autre » et « haie » qui couvrent peu de surface et qui sont bien connectées entre elles, l'indice de connectivité est le plus grand, autour de 1,4 %, pour les pentes moyennes des trois types de peuplement mixte, conifères et feuillus. Cela peut s'expliquer par le fait qu'il y a le plus de pentes entre 10° et 15° sur le site que de pentes inférieures. Pour les pentes faibles et la forêt fermée de feuillus, cet indice est égal à 0,8 %. L'indice sur la cohésion des patchs dans une classe augmente avec la surface occupée par la classe et la connectivité entre les patchs. Ici, les classes avec les plus forts indices de cohésion sont celles des feuillus sur de pentes très faibles, faibles puis moyennes.
Il y a au total 1400 patches. Les localisations des chevreuils couvrent 31 patchs et celles des cerfs 49 patchs. 53 % des localisations pour les chevreuils et 25 % pour les cerfs sont situées dans un même patch classé comme ayant une pente très faible en forêt de feuillus. Pour un des cerfs, 10 % des localisations sont situées dans un autre patch de cette même classe. Ces résultats confirment les préférences des animaux pour ce type d'occupation du sol en particulier chez les chevreuils. Cette cartographie de l'espace peut servir de support à des calculs de connectivité du paysage sur une emprise plus grande que celle de la zone d'étude, ce qui est intéressant lors de déplacements de migration sur de grandes distances.
Les cervidés sont sur un site qui leur est dans son ensemble a priori favorable. Les animaux ont des préférences par rapport à la pente et aux peuplements. Ils présentent aussi des préférences par rapport à l'organisation spatiale des patchs correspondant (distance, répartition). Les cervidés ont tendance à stationner dans des patchs très favorables mais ils sont amenés à en traverser d'autres moins favorables, correspondant à des pentes plus fortes et dans le cas des cerfs, à des peuplements de conifères ou mixtes.

3.2.4. Retour sur la précision et les spécifications des localisations et des données géographiques

La précision des localisations d'animaux

Les analyses sur les localisations sont dépendantes de la justesse des coordonnées enregistrées. Les localisations fausses modifient les résultats des surfaces estimées des domaines vitaux et des distances parcourues. La détection des erreurs de localisations fait appel à une distinction entre les échecs de positionnement et les comportements inhabituels. Bjorneraas *et al.* (2010) sélectionnent les localisations GPS valides récoltées sur des animaux selon le DOP et selon les vitesses et les angles relatifs moyens. Les seuils sur les DOP et PDOP ne suffisent pas toujours et peuvent entraîner des suppressions inutiles. Nous avons donc exploité les distances et les

vitesses. Les localisations générant des variations trop élevées et incohérentes dans les déplacements interpolés sont supprimées. Il est important de prendre en compte l'ensemble des localisations car il peut parfois s'agir de déplacements d'excursion exceptionnelle ou de dispersion en dehors du domaine vital avec des vitesses supérieures à la moyenne. Nous avons analysé en III-1.1 les informations sur le signal satellite des données GPS. Le PDOP et le nombre de satellites donnent des indications sur la qualité des coordonnées spatiales. Cependant, nous n'avons pas effectué de sélection à partir de ce critère car certaines localisations avaient un mauvais PDOP mais semblaient davantage cohérentes que d'autres avec un bon PDOP. Nous avons plutôt effectué une sélection à partir de l'étude des localisations et de leurs relations avec les données géographiques. Les relevés supprimés étaient vraisemblablement incohérents par rapport aux rythmes et aux emprises de déplacements des espèces. Nous décrivons ci-dessous les critères utilisés pour estimer si une localisation paraît cohérente.

Nous avons d'abord comparé les coordonnées en z des localisations GPS avec les valeurs d'altitude du MNT situées aux coordonnées planimétriques. Nous nous sommes basée sur les transformations par grille dans le logiciel Circé pour obtenir les altitudes correspondant aux hauteurs du GPS. Les localisations des renards à Nancy présentent une différence moyenne de 18 mètres avec le MNT en valeurs absolues, entre 5 et 25 m par individu. Si l'on supprime toutes les différences supérieures à 100 m, cette moyenne descend à 15 m. La plus faible différence concerne un individu se situant majoritairement autour d'une voie ferrée et de l'autoroute, peu concernée par les effets de masque générés par les bâtiments et la végétation. Dans la partie II-3.2 en Figure II.25, les deux coordonnées z sont représentées pour un renard et un chevreuil. La moyenne des différences pour le renard était de 16 m et l'écart-type de 14 m. La RNCFS est plus vallonnée que les sites d'étude des renards et des chevreuils en Haute-Garonne, ce qui peut entraîner a priori plus d'écarts. Pour les chevreuils suivis, cet écart est en moyenne de 34 m et pour les cerfs de 46 m. Dans l'exemple illustré en Figure II.25 d'un chevreuil suivi pendant une journée, la différence est de 32 m et l'écart-type de 39 m. Concernant le signe des différences d'altitude, la valeur donnée par le GPS est en moyenne supérieure à celle du MNT, environ de 18 m. Ceci paraît logique vu que le GPS est localisé au cou de l'animal plus haut par rapport au sol. Cependant les écarts restent largement au-dessus de la taille de l'espèce.
Pour les coordonnées planimétriques, la détection des relevés erronés peut s'appuyer sur l'exploitation de la description de la forme et de la temporalité des trajectoires. La chronologie des localisations en parallèle de la distance parcourue est intéressante. Elle permet de remarquer les incohérences dans la succession des localisations, pas toujours détectable par la visualisation des localisations. Pour les cervidés dans la RNCFS, l'étude journalière de chaque individu permet de relever plusieurs incohérences dans les enregistrements GPS, comme illustrées en Figure III.66. Nous cartographions les localisations d'un chevreuil en Figure III.66.a pendant 24 heures à partir de minuit. Celles-ci sont séparées de 5 minutes. La symbolisation de la trace par une teinte dégradée fait ressortir le fait que les déplacements s'effectuent sur de courtes distances. Des déplacements dans un endroit restreint sont alternés avec des déplacements plus longs entre ces endroits. Dans le cas présenté, deux localisations que nous avons reliées par des pointillés rouges, semblent incohérentes avec le reste des localisations. En effet, la longueur des segments de la trace est de près de 1 km en 20 minutes. Elle semble très élevée par rapport aux distances antérieures et postérieures. Cette conclusion est renforcée par la forme du relief : 100 m de dénivelé séparent les deux localisations. Le nombre de satellites est pourtant suffisant, de 4 et 9, et le DOP égal respectivement à 5,7 et 3,2 soit assez bas.

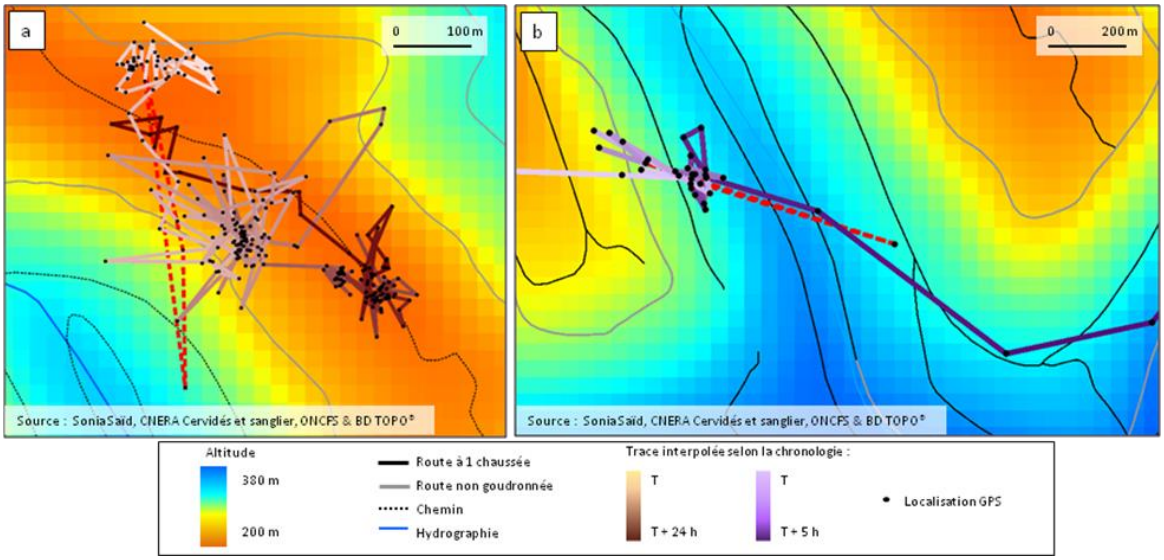


Figure III.66. Représentation de localisations incohérentes avec une trace en pointillés rouges par rapport à la chronologie des autres localisations : a) pour un chevreuil pendant 24 heures, b) pour un cerf suivi pendant 5 heures.

Sur l'ensemble de l'échantillon des chevreuils dans les Vosges, nous relevons entre 1 et 5 localisations erronées par journée de suivi. Pour les chevreuils, les distances parcourues sont plus petites que pour les cerfs. Les localisations incohérentes se repèrent à partir de leur cartographie car elles sont souvent associées à des distances trop élevées. Pour les cerfs, la détermination à partir des distances seules est moins évidente. En Figure III.66.b, un exemple de localisation incohérente est montré dans le suivi d'un cerf pendant 5 heures, en pointillés rouges. Cette localisation est associée à une distance de 800 m pendant 10 minutes avec un aller-retour vers le même lieu. La distance parcourue ensuite pour s'éloigner de ce lieu est de 600 m toutes les 10 minutes, ce qui est proche de la vitesse estimée pour la localisation incohérente.

La cohérence entre les données géographiques et les traces n'est pas évidente à utiliser car l'influence des éléments du paysage sur les déplacements n'est a priori pas connue. La Figure III.67 illustre l'ambigüité de la justesse d'une localisation GPS enregistrée sur un renard. Celle-ci est située par rapport aux autres localisations de l'autre côté d'une route avec un trafic important, à 30 m de celle-ci. La précision des localisations GPS est normalement inférieure à 20 m. Il peut soit s'agir d'une imprécision, ce qui signifierait que le renard n'a pas traversé cette route, soit d'un enregistrement exact des coordonnées. L'enregistrement a en effet eu lieu la nuit vers minuit. Il est situé à 400 m des enregistrements antérieurs et ultérieurs de 10 minutes, ce qui reste cohérent avec la succession des autres localisations correspondant à des déplacements rapides sur de longues distances. Ce même renard visite ce lieu une autre nuit sans qu'aucune localisation ne soit enregistrée de l'autre côté de la route en question. Nous ne pouvons donc pas valider ni l'une ni l'autre hypothèse.

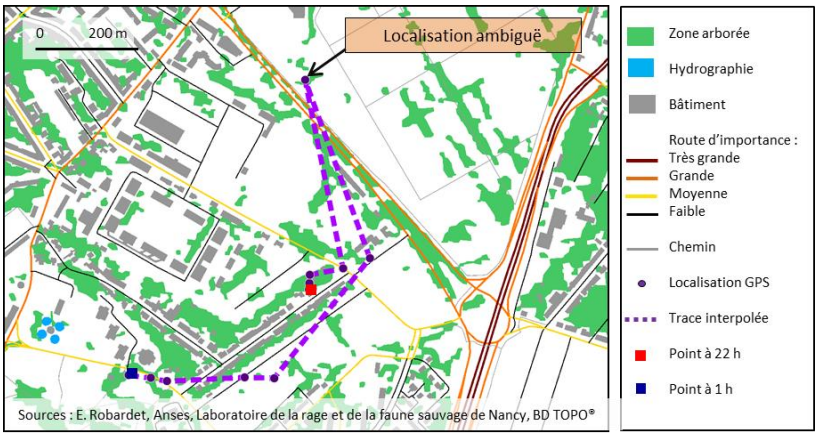


Figure III.67. Localisation incohérente ou détection d'une traversée de route à trafic important par un renard ? Les points sont enregistrés entre 22 h et 22 h 20 puis de 23 h 50 et 1 heure du matin toutes les 5 minutes environ.

L'exemple particulier de la Figure III.67 est similaire à de nombreuses autres localisations car il n'est pas possible de savoir dans quelle mesure les localisations enregistrées sont précises et si elles respectent la position réelle du renard par rapport à la topologie de l'espace (même côté d'une route ou d'une voie ferrée, inclusion ou non dans une zone arborée).

Pour les chevreuils en Haute-Garonne, plusieurs relevés sont imprécis si l'on considère leur position par rapport aux autres localisations et à la chronologie. Dans ce cas d'étude également, la lecture des données géographiques peut porter à confusion. Pour reprendre l'exemple des traversées de routes, il faut donc reconnaître qu'il existe un biais dans le recensement des traversées, ceci en fonction des imprécisions des localisations. Il est difficile de distinguer les comportements irréguliers des imprécisions de positionnement. Ceci n'empêche pas l'identification de tendances dans l'occupation de l'espace par les animaux et les types de déplacements.

Les données géographiques dans l'analyse du paysage

Nous avons décrit dans le chapitre II les données géographiques utilisées lors de la thèse en fonction de leur disponibilité et de leur intérêt potentiel dans la compréhension des déplacements de la faune. Ces données contiennent des informations potentiellement intéressantes sur les facteurs spatiaux influençant a priori les déplacements. L'espace sur lequel se déplacent les espèces peut être caractérisé selon plusieurs aspects. Certains représentent des contraintes, d'autres des lieux favorables. Les bases de données géographiques doivent souvent être adaptées par rapport aux faits étudiés. Les informations qu'elles contiennent peuvent être plus ou moins pertinentes en fonction des sujets de recherche et les utilisations qui en sont faites (Abadie & Mustière, 2010). L'échelle spatiale doit être la mieux adaptée (Josselin, 2010). Par exemple dans Lüsher & Weibel (2013), les données à grande échelle sont utilisées afin de délimiter les centres-villes automatiquement. Les travaux en archéologie incluent plusieurs facteurs environnementaux dans des analyses spatiales afin de reconstruire et d'expliquer les formes de peuplements humains, par exemple dans Nuninger *et al.* (2006). Nous avons utilisé les données à grande échelle spatiale du RGE® ainsi que d'autres données comme les bases Carte Forestière et CORINE Land Cover. Une grande précision spatiale dans la description de l'espace nous a semblé adaptée pour l'étude des relations entre déplacements et paysage étant donnée la précision des localisations GPS. La BD TOPO® fournit des informations intéressantes non seulement sur la géométrie des objets mais aussi sur leur type. Certains traitements de données

ont été nécessaires afin de mener des analyses comme la détermination de la topologie des routes et de la continuité des zones de végétation. Nous avons exploité les attributs sur l'importance et sur le type des routes qui donne une idée de l'intensité du trafic et du revêtement de la voie. La distinction entre voies motorisées et voies non motorisées est remarquée à proximité des animaux pour les cas d'étude des renards et des chevreuils en milieu agricole. Dans la RNCFS, il est intéressant de distinguer les routes forestières goudronnées de celles qui ne le sont pas. Le trafic est nul dans les deux cas et les variations de fréquentation par les cerfs peuvent être dues à des différences de revêtement. Les chevreuils se tiennent peu à proximité des routes forestières mais plus à proximité des chemins moins larges, contrairement aux cerfs. Pour les bâtiments, la distinction de leur fonction (administratif, industriel, habitations) se révèle peu pertinente directement. Elle l'est davantage pour caractériser des types d'urbanisation. Nous avons testé une caractérisation de la densité des bâtiments sur le site de Nancy par le graphe de Voronoï à partir des sommets des habitations. Cette représentation permet de représenter l'intensité des activités humaines et des flux de personnes. Les bâtiments industriels sont souvent inclus dans des zones moins fréquentées par les hommes mais utilisées notamment par les renards. Les données de végétation sont intéressantes d'un point de vue de la connaissance des emprises des zones arborées en milieu urbain par la BD TOPO® et de la connaissance des essences principales en milieu forestier par la Carte Forestière. La distinction dans le taux de couvert est effectuée entre forêt ouverte – 10 à 40 % de couvert – et forêt fermée – au-dessus de 40 % (IGN, 2012). Le couvert de la forêt fermée n'est pas nuancé, ce qui pourrait être pertinent pour expliquer la situation des animaux. Nous n'avons pas caractérisé les lisières qui sont intéressantes en termes de ressources alimentaires pour les cervidés notamment les chevreuils. La base CORINE Land Cover nous a permis de compléter les analyses de données par des informations sur certaines occupations du sol absentes du RGE® comme les prairies et les champs cultivés. Cette base nous a aussi permis de visualiser à moyenne échelle spatiale si des changements sur les territoires étaient survenus entre 1990 et 2006 qui est la date de la dernière mise à jour. Peu de différences sont remarquées : dans la RNCFS, une partie des lieux fréquentés par les cervidés présentent une alternance entre des peuplements mixtes et des peuplements arbustifs et en mutation au cours des années.

Les observations du terrain ont complété la description de l'espace par les sources de données. Le travail de terrain permet d'appréhender la dynamique des territoires étudiés notamment à travers les actions humaines. Par exemple des constructions de bâtiments ou de grandes infrastructures de transport indiquent un certain dynamisme économique, ce qui peut impliquer des aménagements futurs et une modification des espaces parcourus par les espèces. Certaines informations nous ont paru pertinentes à prendre en compte parce qu'elles pouvaient expliquer des déplacements. Par exemple certains objets ne sont pas saisis dans les bases comme les barrières plus ou moins hermétiques aux déplacements des animaux : clôtures, grillages, murs. En milieu forestier dans les Vosges, la photo-interprétation des images aériennes ajoute de l'information sur le taux de couvert. Nous n'avons pas obtenu de résultats satisfaisants avec les méthodes de classification automatique, cependant cet aspect pourrait être développé. La non-simultanéité des sources de données géographiques et des suivis des animaux ajoute une part d'incertitude dans les relations entre déplacements et espace. L'approche paysagère des lieux favorables à la présence et/ou aux déplacements des animaux s'appuie sur une description des occupations du sol enrichie par des connaissances sur les préférences spatiales des espèces. La connaissance des déplacements à grande échelle temporelle permet d'identifier les lieux effectivement parcourus. L'analyse spatiale que nous avons effectuée sur le site des Vosges peut être une amorce de cartographie des continuités paysagères favorables aux déplacements. Sur de larges emprises, cette cartographie fait appel à des agrégations de certaines données comme

pour les zones urbanisées, à l'image des méthodes de définition de la Trame Verte et Bleue (Amsallem *et al.*, 2010). La continuité et l'isolement de la végétation peuvent être des indicateurs intéressants à prendre en compte dans la mise en œuvre de corridors écologiques notamment en milieu urbanisé (Puissant *et al., 2012*). Au contraire, l'extraction d'obstacles comme des points noirs sur le réseau routier s'appuie sur l'analyse des réseaux : fragmentation des zones préservées, jumelage des effets de différents types de grandes infrastructures (Vanpeene & Pissard, 2012). Les hypothèses que nous formulons pour l'influence de l'espace sur les déplacements d'animaux concernent des échantillons de données. Elles sont à considérer dans le cadre des données utilisées. Nous nous sommes concentrés sur l'environnement spatial. Une part d'aléatoire reste importante. Les dérangements extérieurs comme le volume sonore, les sources lumineuses ou les relations entre les individus et entre les espèces, ne sont pas connues. Nous ne pouvons pas expliquer la totalité des influences et des motivations aux déplacements des animaux, compte tenu également des comportements individuels.

RÉSUMÉ DE L'INFLUENCE DES ÉLÉMENTS DU PAYSAGE SUR LES DÉPLACEMENTS

Nous avons analysé de manière systématique des relations spatiales entre les différentes informations représentées par les suivis des animaux et les bases de données géographiques. Nous avons qualifié le rôle des différents éléments du paysage sur les déplacements en fonction des espèces et des sites d'étude qui correspondent à des milieux et à des profils paysagers particuliers, c'est-à-dire à des compositions et des configurations des éléments du paysage. Ces éléments du paysage peuvent être des lieux d'intérêt qui motivent les déplacements ou alors des lieux évités. Ils peuvent aussi favoriser les déplacements par un rôle de corridor ou représenter un obstacle freinant les traversées. Les résultats des analyses descriptives et statistiques présentés au cours de ce chapitre servent de support pour la caractérisation de l'espace fonctionnel utilisé par les espèces animales. Cette notion d'espace fonctionnel est définie à partir des données géographiques à grande échelle, ce qui permet ensuite de réutiliser ces mêmes données dans notre démarche d'évaluation des effets d'aménagements. La considération des comportements spatiaux a été effectuée par individu et par espèce afin d'identifier des différences interindividuelles et de déterminer quels comportements sont généralisables à l'espèce. Nous récapitulons dans le Tableau III.22 les comportements de préférence et d'évitement des éléments du paysage par les animaux.

Nous avons utilisé les fonctionnalités de logiciels SIG et statistiques. Le développement des méthodes d'analyses spatiales a été effectué dans un module de GeOxygene. Ce module prend en compte les localisations GPS. Il permet de construire des trajectoires et d'en analyser les caractéristiques. Des méthodes analysent les données géographiques dans différentes emprises : autour des localisations ponctuelles et dans les espaces parcourus par les animaux.
La connaissance des déplacements contribue à améliorer leur prise en compte dans les projets d'aménagement du territoire. Des mesures de compensation aux constructions d'infrastructures peuvent être adaptées aux espèces et à la configuration paysagère. Nous proposons dans le chapitre suivant d'utiliser les connaissances issues des analyses dans un modèle de simulation de trajectoires. Cette modélisation a pour but de tester les relations entre paysage et déplacements puis d'évaluer les effets de modifications spatiales. La définition d'un modèle de données prend en compte les différents éléments du paysage étudié dans ce chapitre et les hypothèses de leur appréhension par les animaux.

Tableau III.22. Synthèse du rôle des éléments du paysage sur la présence et le déplacement des trois espèces animales par site d'étude. Les relations qui ont été validées par les analyses descriptives et statistiques sont indiquées dans la colonne 'validation'.

Rôle des éléments du paysage sur les déplacements	**Renard en milieu périurbain**	*validation*	**Chevreuil en milieu agricole**	*validation*	**Chevreuil en milieu forestier vallonné**	*validation*	**Cerf en milieu forestier vallonné**	*validation*
Intérêt	Zone arborée	V	Culture, prairie		Peuplement forestier de feuillus	V	Peuplement forestier de feuillus	V
	Jardin, parc urbain	V	Zone arborée		Pente très faible en-dessous de 5° et faible jusqu'à 10°	V	Pente faible jusqu'à 10°	V
	Zone d'activités	V			Altitude élevée	V		
	Zone résidentielle							
Déplacement entre deux zones d'intérêt	Zone arborée		Zone arborée, haie		Peuplement forestier de feuillus ou mixte avec conifères	V	Peuplement forestier de feuillus	V
	Chemin, route non goudronnée		Cours d'eau		Sentier et chemin	V	Route forestière goudronnée ou non	V
	Voie ferrée	V			Pente jusqu'à 20°	V	Pente jusqu'à 20°	V
Évitement	Route avec trafic routier	V	Route avec trafic routier		Peuplement forestier de conifères	V	Peuplement forestier de conifères	V
	Bâtiment	V	Bâtiment		Pente forte supérieure à 20°	V	Pente forte supérieure à 20°	V
Obstacle	Route avec trafic routier, autoroute	V	Autoroute et route avec un trafic important		Pente forte supérieure à 20°		Pente forte supérieure à 20°	
	Voie ferrée	V	Voie ferrée		Route avec trafic routier		Route avec trafic routier	
	Grillage							

CHAPITRE IV
–
PROPOSITION D'UN MODÈLE DE SIMULATION DES DÉPLACEMENTS DE LA FAUNE EN FONCTION DE L'ESPACE ET EXPÉRIMENTATIONS

INTRODUCTION

La mise en œuvre d'aménagements sur un territoire entraîne des modifications dans les milieux de vie de la faune sauvage. Il n'est pourtant pas évident d'évaluer précisément les conséquences que ces aménagements peuvent avoir sur les espèces animales et sur le territoire. Or, les aménageurs doivent intégrer dans leur cahier des charges une estimation de ces conséquences en amont de la réalisation des projets. L'évaluation des effets des modifications du paysage s'appuie idéalement sur des observations passées menées à différentes temporalités et avec des spécifications similaires. Ces observations ne sont pas exhaustives car elles ne concernent pas toutes les espèces animales ni tous les individus. Les connaissances sur l'adaptation des animaux aux changements de leur environnement nécessitent des suivis sur de longues durées qui font appel à des comparaisons entre un état antérieur et un état postérieur aux modifications. Au chapitre III, nous avons analysé des traces enregistrées sur trois espèces et sur plusieurs sites. Ces données permettent de connaître les déplacements des animaux et fournissent des informations difficiles à récolter par des observations visuelles directes. Les traces superposées avec la description de l'espace géographique ont été analysées en termes de relations spatiales et temporelles. À partir de ces analyses, nous avons formulé et testé des hypothèses sur l'influence des éléments topographiques et des occupations du sol sur les déplacements. Certaines de ces hypothèses sur les relations entre paysage et déplacements ont pu être validées par les différentes analyses descriptives et statistiques ainsi que par la littérature. Dans la deuxième partie de notre approche, présentée dans ce chapitre, nous exploitons les résultats de ces analyses pour définir un modèle de données sur les relations entre déplacements et environnement spatial selon les espèces animales. Notre objectif est de lancer des simulations de trajectoires en fonction de comportements prédéfinis afin de pouvoir tester l'effet d'aménagements sur ces trajectoires simulées et à terme d'évaluer leurs conséquences sur la mobilité des espèces. Nous commençons par formaliser les concepts en jeu lors des études de déplacements de la faune. Nous définissons un modèle de données intégrant les connaissances issues des résultats d'analyses, de la bibliographie et des experts (partie IV-1). Ce modèle de données intégrant les connaissances sur l'appréhension de l'espace par les animaux sert ensuite de base pour le lancement de simulations de déplacements. Nous proposons de construire des trajectoires individuelles à partir des comportements propres aux espèces et en intégrant une part de comportement individuel, ainsi qu'à partir des hypothèses sur les relations entre les éléments du paysage et les déplacements. Cela implique la détermination d'une méthode de simulation de trajectoires s'appuyant sur une plateforme informatique et des données

géographiques numériques. Nous décrivons la solution choisie qui s'appuie sur une modélisation orientée agent (partie IV-2). La sélection des paramètres de simulation est décrite. Nous mettons en œuvre des expérimentations afin de visualiser les résultats de simulation par espèce dont le comportement a été modélisé et implémenté dans notre système (partie IV-3). Les observations sont comparées avec les résultats de simulation afin de proposer des améliorations à notre modèle existant. Nous définissons ensuite des scénarios d'aménagements du territoire, puis nous regardons les effets sur les trajectoires simulées (partie IV-4). Nous concluons par une synthèse critique sur la modélisation et les simulations (partie IV-5).

1) DÉFINITION DU MODÈLE CONCEPTUEL DE DONNÉES

Nous présentons dans cette première partie le modèle de données sur les relations entre espace et espèces animales, issu de la synthèse des connaissances bibliographiques et des résultats d'analyses de données. Le modèle comporte les informations permettant de représenter les connaissances et de simuler les déplacements sur un espace.

1.1. Définition du vocabulaire utilisé

De nombreuses observations et études ont permis d'augmenter les connaissances sur les comportements des animaux et sur leurs interactions avec l'espace. Ces connaissances concernent les éléments du paysage qui influencent les déplacements. Ces éléments peuvent soit représenter des obstacles soit favoriser les déplacements. Ils peuvent également être neutres, c'est-à-dire ne pas avoir a priori de conséquences sur les déplacements. À ce stade du mémoire, nous avons désigné le rôle des éléments du paysage par un vocabulaire général, de préférence spatiale ou d'évitement. Ces préférences spatiales ou ces évitements pouvaient aussi correspondre à des corridors de déplacement ou bien à des obstacles. Nous avons vu en effet que les occupations du sol de l'espace dans lequel se déplacent les animaux se recoupent avec celles sur lesquelles ils sont présents car ces occupations du sol correspondent à des ressources ponctuelles ou à un habitat favorable. Le lien entre la présence des animaux dans des lieux de vie et leurs déplacements est donc important. Ces lieux de vie sont également définis. Nous précisons à présent ce vocabulaire, qui est employé dans ce cadre par la suite sauf indication contraire. Quatre rôles – ou fonctions – principaux sont définis :

- les obstacles ;
- les éléments favorables aux déplacements ;
- les éléments d'intérêt ;
- les éléments évités.

La Figure IV.1 reprend ces quatre rôles en distinguant les éléments utilisés et parcourus physiquement lors des déplacements (intérêt de destination et favorable au déplacement), et les éléments non utilisés (évités et faisant obstacle).

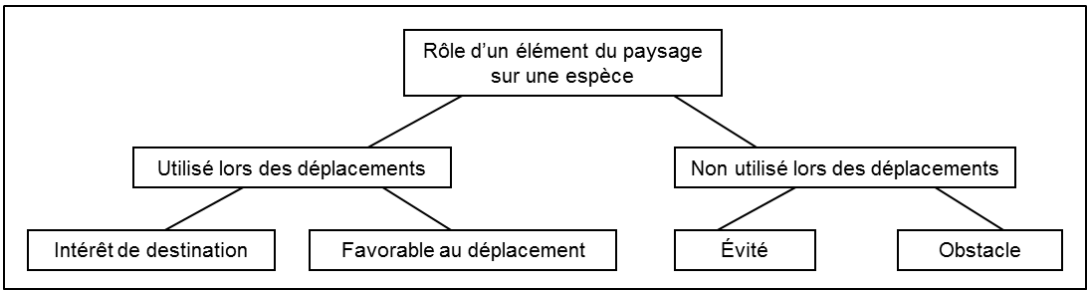


Figure IV.1. Les rôles des éléments du paysage sur les déplacements d'une espèce animale.

Les analyses spatiales ont été menées sur deux catégories : l'espèce sans distinction des individus, et l'individu. Notre approche a été de réunir les comportements identifiés vis-à-vis des éléments du paysage par espèce animale, tout en notant les différences interindividuelles possibles. Voici les définitions telles que nous les entendons dans la qualification des rôles des éléments du paysage sur les espèces animales.

- Les obstacles :

Un obstacle est un élément du paysage qui arrête, freine ou gêne le déplacement d'un animal. Plusieurs types d'obstacles existent. Certains obstacles empêchent physiquement les animaux de se déplacer. Par exemple, des murs peuvent être hermétiques pour des mammifères et rendre leurs traversées impossibles. Le terme d'obstacle peut également être entendu dans le sens d'une limitation aux déplacements, c'est-à-dire que l'obstacle n'empêche pas systématiquement les traversées mais en réduit la fréquence. Par exemple, un relief escarpé peut diminuer les déplacements. Les routes, par les dérangements et le danger qu'elles représentent, peuvent éloigner les animaux et limiter leurs traversées. Il peut ainsi s'agir d'obstacle lorsqu'un danger est associé et que la mortalité est accrue par l'élément considéré, comme par exemple les routes où circulent les véhicules qui peuvent tuer les animaux qui les traversent. Nous incluons l'ensemble de ces sens dans le terme d'obstacle car il nous semble important de prendre en compte tous les effets limitants des éléments du paysage sur les déplacements de la faune. Dans l'état de l'art, le terme obstacle est largement utilisé et son sens se superpose avec notre emploi. Il englobe plusieurs phénomènes comme l'effet de barrière des éléments du paysage sur les déplacements (Vanpeene-Bruhier & Berne, 2005). Nous utilisons les deux termes – obstacle et barrière – par la suite, même si le terme obstacle désigne davantage l'élément physique que l'effet produit. La notion d'obstacle peut être désignée par d'autres éléments de vocabulaire. Le guide de l'élaboration de la Trame verte et bleue (COMOP TVB, 2010) se concentre principalement sur les obstacles qui engendrent des discontinuités dans les milieux de vie et qui isolent les écosystèmes. Ils représentent donc des éléments perturbant la dispersion de la faune et peuvent être d'emprise linéaire (infrastructure de transport linéaire) ou surfacique (zone urbaine dense). La nature des obstacles peut être distinguée selon un gradient d'artificialité : artificiels comme par exemple les bâtiments, les routes, les murs, les éoliennes, et naturels comme les grands fleuves, les falaises et les ruptures de pentes importantes.

- Les éléments favorables au déplacement :

Un élément favorable au déplacement est utilisé préférentiellement par les animaux pour se déplacer et leur permet de relier des lieux d'intérêt. Nous choisissons ce vocabulaire d'« élément favorable » afin d'éviter la confusion avec les autres termes utilisés pour nommer les éléments du paysage aménagés qui ont pour but de permettre aux animaux de se déplacer dans leur espace de vie ou lors de migrations. Le mot corridor est généralement compris dans le sens des corridors écologiques et inclut des aménagements plus ou moins importants réalisés par l'homme (Bennett & Mulongoy, 2006). Les corridors impliquent une configuration paysagère potentiellement favorable à plusieurs espèces et permettant de relier des lieux de vies séparés par des obstacles ou par une matrice ne correspondant pas à l'habitat de l'espèce. Les couloirs de déplacement sont souvent utilisés comme synonymes des corridors, comme par exemple lors des études préalables à la définition de la Trame verte et bleue (DREAL Rhône-Alpes, 2008). Dans Burel & Baudry (1999), les corridors sont « des éléments linéaires du paysage, qui jouent un rôle particulier dans les flux au niveau du paysage ». Leur influence peut être de faciliter plus ou moins les déplacements selon les espèces. Dans notre mémoire, nous utilisons corridors et éléments favorables au déplacement dans le même sens. Les éléments favorables peuvent être aménagés ou non, mais restent dans les deux cas empruntés par les animaux lors de leurs déplacements de manière préférentielle par rapport à d'autres éléments du paysage. La préférence peut se traduire en prenant en compte un voisinage plus ou moins large et elle peut être définie par rapport aux autres éléments du paysage. Dans les documents de définition de la Trame verte et bleue (COMOP TVB, 2009), les auteurs parlent d'éléments renforçant la « fonctionnalité de l'interconnexion dans les paysages ». Les « points de perméabilité » mentionnés sont quant à eux des « ouvrages permettant à priori le franchissement des

infrastructures linéaires de transport par la faune » (COMOP TVB, 2010). Ils sont en opposition avec les points noirs qui sont des lieux de conflit en particulier entre le réseau routier et la faune.

- Les éléments d'intérêt :

Les éléments d'intérêt pour les espèces sont des éléments du paysage qui attirent les animaux, pour une durée pouvant être variable. Il peut s'agir d'un habitat propice à la présence d'animaux, grâce à la qualité du milieu et ainsi à sa potentialité à constituer un lieu de vie intéressant, comme dans Berthoud *et al.* (2004). L'élément d'intérêt se superpose alors avec le domaine de vie des animaux répondant à leurs besoins. Il peut aussi s'agir de lieux de destination, correspondant à un déplacement actif (alimentation, cachette) ou à du repos (gîte). Les lieux où se situent des ressources alimentaires motivent les déplacements à l'intérieur ou en dehors de l'espace parcouru habituellement. Dans nos cas d'étude, nous avions associé une notion de durée. Les analyses statistiques des localisations ont par exemple mis en évidence que les déplacements des chevreuils étaient moins rapides (beaucoup de localisations dans une même cellule de la grille spatiale) dans les peuplements de feuillus que dans les peuplements mélangés qui représentent un intérêt moindre en ressource alimentaire pour cette espèce. Plusieurs renards en milieu périurbain restent pendant la journée dans des gîtes de repos situés dans des zones arborées. De manière générale, les éléments d'intérêt constituent des motivations aux déplacements et ils influencent les individus dans leurs déplacements, lors d'un rythme journalier (recherche de nourriture dans le domaine de vie) ou annuel (exploration vers de nouvelles ressources potentielles).

- Les éléments évités :

Les éléments évités sont les éléments dans ou près desquels les animaux sont peu présents et se déplacent peu. Par rapport aux obstacles, ils ne gênent a priori pas les déplacements, mais ne représentent pas pour un animal un intérêt de parcours et ne correspondent donc à aucun besoin. Dans nos cas d'étude, nous avons vu par exemple que les chevreuils et les cerfs pouvaient se situer sur des pentes supérieures à 20° mais principalement lors de déplacements rapides. Les deux espèces évitaient également les peuplements de résineux, peu intéressants en termes de ressources.

À la fin du chapitre III, nous avions résumé d'après nos résultats, ces données selon quatre rôles correspondant à présent au vocabulaire défini : élément obstacle ou barrière, élément favorable au déplacements ou corridor, élément d'intérêt représentant une motivation, élément évité. La caractérisation de l'espace par les quatre concepts précédents peut être ramenée à deux grandes catégories d'influence sur l'action de mouvement des animaux : des éléments utilisés et des éléments freinant ou arrêtant les déplacements (voir Figure IV.1). La composition du paysage en catégories d'occupation du sol influence en parallèle la répartition des espèces qui exploitent alors des espaces comprenant plus ou moins des obstacles ou des éléments favorables. Un même élément du paysage peut être caractérisé par plusieurs concepts à la fois. Les éléments d'intérêt peuvent en effet aussi être des lieux de passage. Nous avons mentionné dans l'état de l'art le rôle de la végétation pour plusieurs espèces. Par exemple, les martres peuvent utiliser de petites zones forestières fragmentées comme substitut d'habitat ou comme lieu de passage (Pereboom, 2006), de même pour les chevreuils avec les haies en milieu agricole (Cargnelutti, 2007). Les obstacles peuvent aussi être évités lorsqu'ils représentent des dérangements, comme par exemple les routes dont les bords peuvent tenir la faune éloignée. Les éléments peuvent être caractérisés différemment selon l'activité de l'animal et donc selon la période temporelle (cycle de vie au cours d'une journée ou au cours d'une année par exemple). Ainsi, pour les renards, la végétation arborée peut être utilisée comme un élément favorable aux déplacements

(lieu de passage) et comme un élément d'intérêt motivant les déplacements (ressources ou gîte de repos adapté). Les concepts définis permettent de dissocier le rôle des éléments du paysage de leur type (route, végétation, etc.). Cela permet aussi d'attribuer aux mêmes types d'élément du paysage des rôles différents : par exemple, les renards ont tendance à éviter les routes en milieu périurbain alors que les cerfs en milieu forestier les longent.

La Figure IV.2 indique les données de la BD TOPO® correspondant aux thèmes d'occupation du sol. Ces données sont caractérisées selon leur rôle sur les déplacements nocturnes des renards en milieu périurbain, c'est-à-dire pendant la période d'activités et de déplacements importants des renards. L'influence détectée lors des analyses concerne des lieux correspondant à ces types d'occupation du sol. Par exemple, nous indiquons que les zones arborées peuvent être des lieux favorables aux déplacements car nous remarquons un parcours dans des zones arborées particulières par les animaux suivis. Nous considérons que plusieurs rôles peuvent être attribués à un même thème d'éléments du paysage. Par exemple, le bâti peut représenter un intérêt par sa proximité de ressources d'origine anthropique mais il constitue aussi un obstacle car il n'est pas traversable.

	Rôle des éléments du paysage dépendant de l'espèce, de l'espace et de la période : **Exemple pour le renard, en milieu urbain et pendant la nuit**			
Type d'occupation du sol selon la BD TOPO®	Intérêt	Évitement	Favorable au déplacement	Obstacle au déplacement
Bâtiment	proximité de ressources d'origine anthropique			non traversable
Zone d'activité (industrielle, commerciale)	proximité de ressources d'origine anthropique		peu de perturbations anthropiques	
Route motorisée		bruit du trafic et trottoirs avec peu de cachettes		trafic et bas-côtés aménagés
Voie d'accès non motorisée			Pas de trafic et milieu ouvert	
Végétation arborée	lieu de repos et de ressources potentielles		Peu de visibilité de l'extérieur	
Hydrographie				aménagement des berges
Pente faible			peu d'effort à fournir	
Pente forte				effort supplémentaire

Figure IV.2. Rôle possible des types d'occupation du sol de la BD TOPO®. Exemple d'un renard en milieu périurbain en période nocturne.

Les rôles identifiés en Figure IV.1 peuvent être déclinés en fonction de l'espèce, de l'espace et de la période temporelle considérée. Nous appelons l'espace fonctionnel, l'espace tel qu'il est effectivement utilisé par les animaux. Les éléments du paysage sont utilisés selon leur rôle sur les espèces animales. La connectivité fonctionnelle d'un paysage s'applique par exemple lorsque les éléments du paysage permettent le parcours de l'espace par les individus, et autorisent des flux de populations (Burel & Baudry, 1999). La cartographie des éléments du paysage selon leur rôle permet de visualiser les connexions et les zones d'obstacle qui peuvent être jumelées avec l'influence des occupations du sol environnantes. Les corridors et les obstacles potentiels peuvent être identifiés. Nous présentons en Figure IV.3 la cartographie des éléments du paysage sur le site d'étude de Pontarlier par rapport à leur rôle sur les déplacements pour les renards.

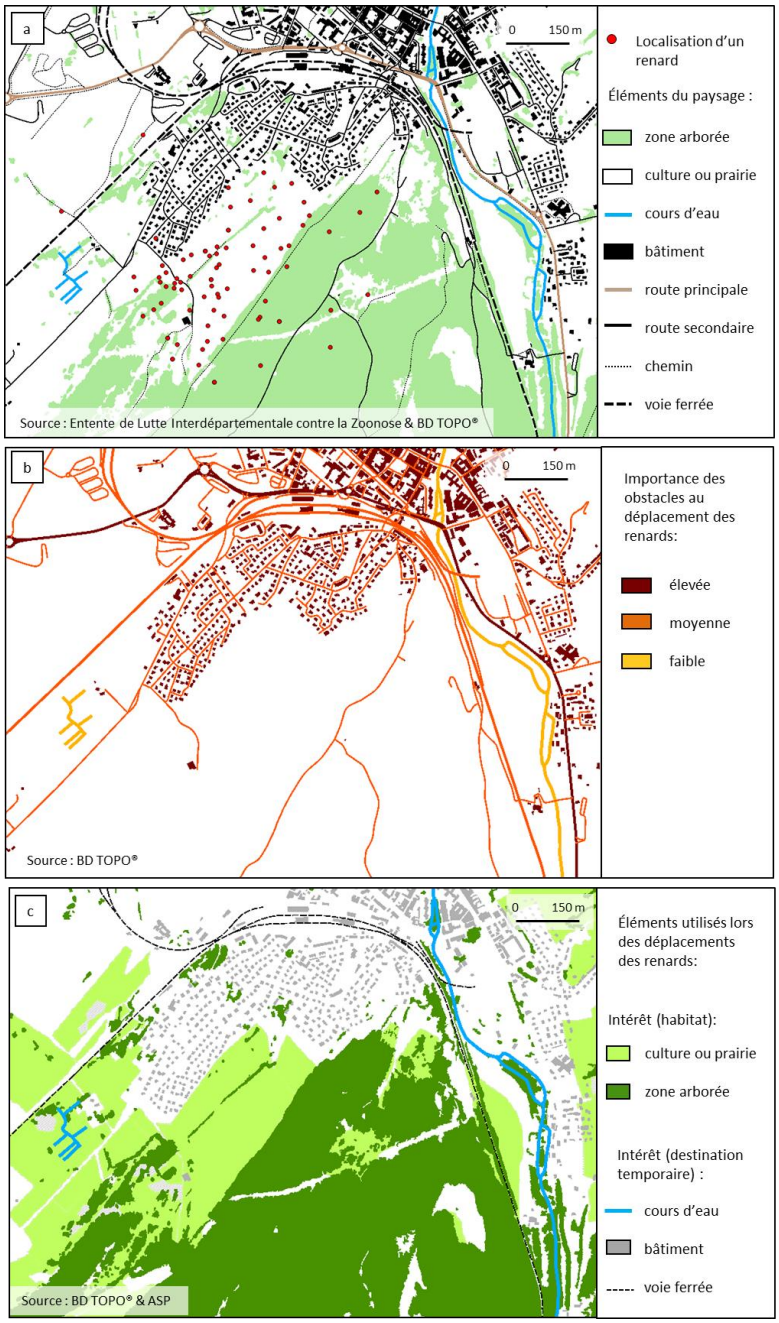


Figure IV.3. L'influence des éléments du paysage sur les renards à Pontarlier (25) : a) les éléments du paysage contenus dans la BD TOPO® et les localisations d'un renard pendant 20 mois, b) les obstacles, c) les zones a priori favorables au déplacement.

Pour les renards, les obstacles aux déplacements cartographiés en Figure IV.3.b sont les bâtiments, les routes principales et secondaires, les voies ferrées et les cours d'eau importants comme le Doubs à l'est de la carte. Il semble que le jumelage des grandes infrastructures de transport (routes, voies ferrée) crée une barrière au sud de laquelle se situe le renard suivi. Cette barrière est renforcée par la zone résidentielle et la rivière le Doubs à l'est. Pour les éléments utilisés lors des déplacements en Figure IV.3.c, nous avons distingué ceux qui représentent un habitat pour les renards – cultures, prairies (fond cartographique du Registre Parcellaire Graphique), végétation arborée –, de ceux qui peuvent correspondre à des motivations temporaires – voie ferrées et cours d'eau, deux éléments dont les abords peuvent être recouverts de végétation et peu habités, bâtiment pour les ressources d'origine anthropique. Le

rôle de certains éléments peut donc être double. Par exemple, les bâtiments sont des obstacles mais peuvent également représenter un intérêt pour des ressources potentielles. C'est aussi le cas des voies ferrées et des cours d'eau qui peuvent limiter les traversées mais dont le voisinage spatial peut constituer un corridor de déplacement ou à une occupation du sol favorable aux renards. On distingue le déplacement qui longe un élément de celui qui le traverse. Pour les éléments du paysage linéaires comme les routes ou les cours d'eau (modélisés par une géométrie linéaire dans la BD TOPO®), nous ne prenons pas en compte l'emprise surfacique réelle mais nous utilisons des attributs, par exemple l'intensité du trafic routier. En plus du rôle des éléments du paysage, nous prenons en compte l'importance de leur influence. Dans le document COMOP TVB (2010), la valeur des obstacles est désignée via le niveau de « franchissabilité ». Elle hiérarchise en particulier les routes et les voies ferrées selon leur type et leur trafic. Dans Burel & Baudry (1999), la notion de viscosité d'un élément du paysage est définie par le rapport entre la surface parcourue et le taux de mortalité dans cet élément, multiplié par le rapport entre le taux de mortalité et la surface parcourue mais dans l'ensemble du site étudié. L'augmentation de la valeur de viscosité indique que les animaux se situent davantage dans cet élément que dans le reste du site. Cet indice se rapproche de l'importance de l'intérêt d'un élément que nous attribuons pour une espèce. Nous représentons en Figure IV.4 les routes et les cours d'eau selon l'importance de leur rôle d'obstacle sur les renards.

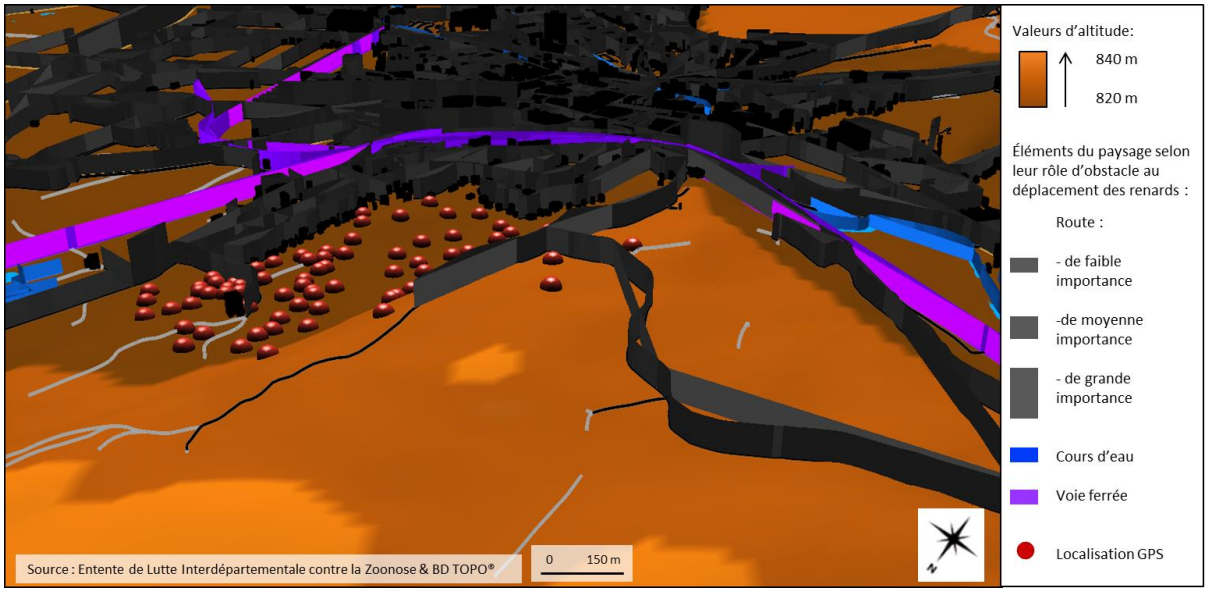


Figure IV.4. Visualisation avec un point de vue à 45 degrés sur la scène en 3D des voies de transport et des cours d'eau sur le MNT dans la plateforme GeOxygene. Pour les voies, l'importance de leur rôle d'obstacle est déterminée en fonction de l'intensité du trafic. Pour les cours d'eau, la hauteur du symbole est identique quelles que soient leurs caractéristiques.

Nous avons attribué en Figure IV.4 une hauteur au cours d'eau afin de représenter symboliquement leur rôle de limitation aux traversées par les renards. La hauteur du symbole des routes dépend de l'intensité du trafic. Ces éléments linéaires sont posés sur un MNT des altitudes. Cette symbolisation 3D des éléments du paysage permet de visualiser de manière symbolique l'influence des obstacles et de représenter comment les éléments sont perçus par les animaux. L'espace perçu par les animaux, par les rôles des éléments du paysage, est intégré par la suite dans les choix de modélisation des données géographiques et des trajectoires, dans le but de développer un module informatique de simulation des déplacements.

1.2. Proposition d'un modèle de données de caractérisation des relations entre l'espace et les déplacements

Nous définissons une modélisation des concepts mobilisés dans les études sur les déplacements de la faune. Nous proposons un modèle de données pour représenter les relations entre le paysage, les espèces animales et leurs déplacements. Ce modèle est orienté objet, c'est-à-dire qu'il décrit les entités puis leurs relations (Rumbaugh *et al.*, 1991). Dans notre application, il prend en compte la description des éléments du paysage et des déplacements. Les trois dimensions spatiales – x, y, z – sont considérées ainsi que la dimension temporelle t. Il formalise les connaissances établies sur la faune et les comportements par espèce. Il intègre les données en entrée : bases de données géographiques et localisations enregistrées des animaux. Le modèle décrit ainsi les données initiales utilisées et les résultats d'analyses comme par exemple les analyses des configurations paysagères et la reconstruction et l'analyse des trajectoires spatio-temporelles. Nous formalisons les relations issues des analyses des relations entre données de déplacements et données géographiques. Les cas d'étude nous permettent de préciser les connaissances issues de la littérature. Ils apportent à notre modèle des connaissances issues d'observations directes (cf. chapitre III) et non conceptualisées. Leurs analyses nous apportent une précision dans les connaissances sur les déplacements. Elles peuvent mettre en évidence des comportements particuliers d'individus et des espèces animales qui sont intéressants pour déterminer le niveau de généralisation des concepts. Par exemple, pour une tache de végétation, on détermine son rôle par rapport à ses caractéristiques biophysiques et par rapport à son type d'exploitation par les espèces animales. Le modèle de données sert de base aux simulations de déplacements menées par la suite. La Figure IV.5 décrit les concepts principaux ainsi que les relations.

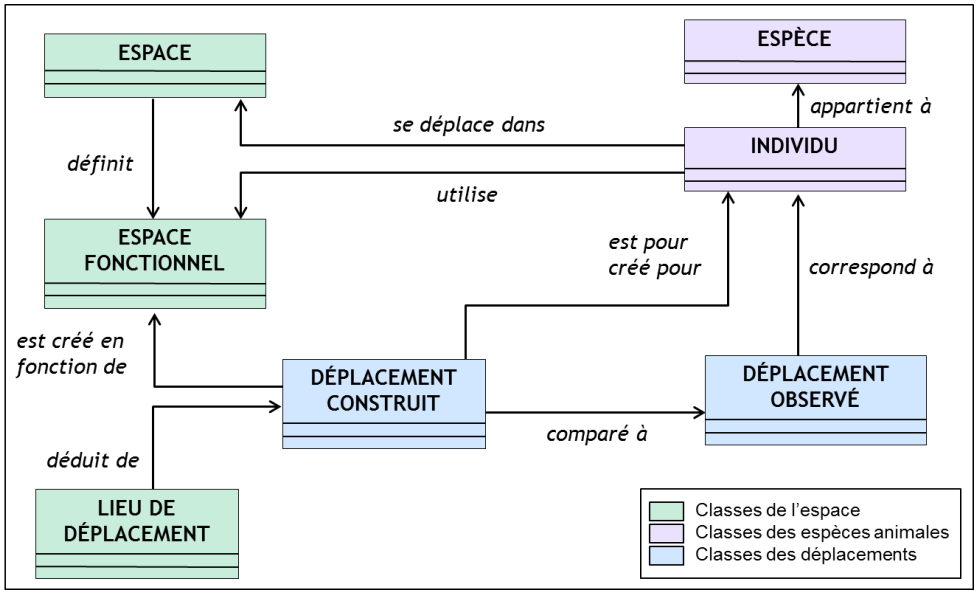


Figure IV.5. Les concepts principaux du modèle de données proposé.

Nous incluons dans le modèle les déplacements observés et les déplacements construits par simulation. Ces déplacements sont effectués par un individu (un animal) appartenant à une espèce ayant un comportement spatial propre. Les individus se déplacent dans un espace qui est décrit par ses composantes sans prendre en compte leur rôle, puis en caractérisant leur influence sur les déplacements. Le concept d'espace fonctionnel correspond donc à l'espace perçu et utilisé par les animaux. Le modèle s'appuie sur les résultats d'analyses de l'ensemble

des localisations correspondant aux différents individus des espèces suivies. Les comportements ont été caractérisés par espèce, avec une considération de l'existence d'un comportement individuel et influencé aussi par le contexte environnemental. Nous avons ajouté les lieux de déplacements qui sont les lieux empruntés de façon privilégiée par les animaux et que nous souhaitons aussi déduire à partir des résultats de simulation.
À partir des concepts généraux, nous détaillons à présent le modèle qui est présenté en Figure IV.6 sur la page suivante. La formalisation adoptée est l'UML (*Unified Modeling Language*). Les classes représentent les concepts et celles-ci sont liées entre elles par des relations d'association, d'héritage, de composition et d'agrégation. Nous avons regroupé les classes en trois grands groupes : l'espace, les espèces animales et les déplacements. Les relations existent entre les classes d'un même groupe et de groupes différents. Nous avons également défini une classe en dehors de ces trois groupes. Il s'agit de la classe *carte* développée pour faciliter l'implémentation du modèle dans un module informatique. Cette carte permet de définir le site d'étude (nom, emprise) et décrit les objets chargés (données géographiques, localisations, trajectoires) via le module informatique.

Nous présentons les classes du modèle organisées en quatre grands groupes dont le nom est indiqué en italique en Figure IV.6. Les classes du modèle sont décrites en mentionnant le lien avec les bases de données pour représenter chaque classe, utilisées dans nos analyses et dont certaines seront exploitées lors de nos expérimentations sur les simulations de déplacements présentées ultérieurement.

- Les classes de l'espace

L'espace est décrit à la fois selon sa composition en éléments du paysage, et en tant qu'espace fonctionnel prenant en compte les rôles de ces éléments du paysage vis-à-vis des espèces animales. Ces éléments sont physiquement représentés dans les bases de données par des objets à partir desquels il est possible de mener des analyses spatiales sur la composition et la configuration des éléments du paysage (calcul de la proximité, d'indices sur la fragmentation, des relations topologiques). Les analyses spatiales sur les cas d'étude ont été développées dans le chapitre III (notamment en partie III-2). Ces méthodes pourraient être appliquées à d'autres sites et à d'autres espèces animales dans la perspective d'enrichir le modèle.

- Les *Éléments du paysage*

Les éléments du paysage sont ceux présents sur un site d'étude. Ils sont soit d'origine naturelle, plus ou moins aménagés par l'homme – relief, hydrographie, végétation –, soit il s'agit de constructions anthropiques comme les bâtiments et les routes. Le relief et la typologie de l'espace ont une couverture de l'espace continue en le décrivant en tout point, alors que les occupations du sol sont ponctuelles.

- Le *relief* est décrit par les altitudes, à partir desquelles on peut calculer les pentes. Le MNT utilisé a un pas de 25 m.

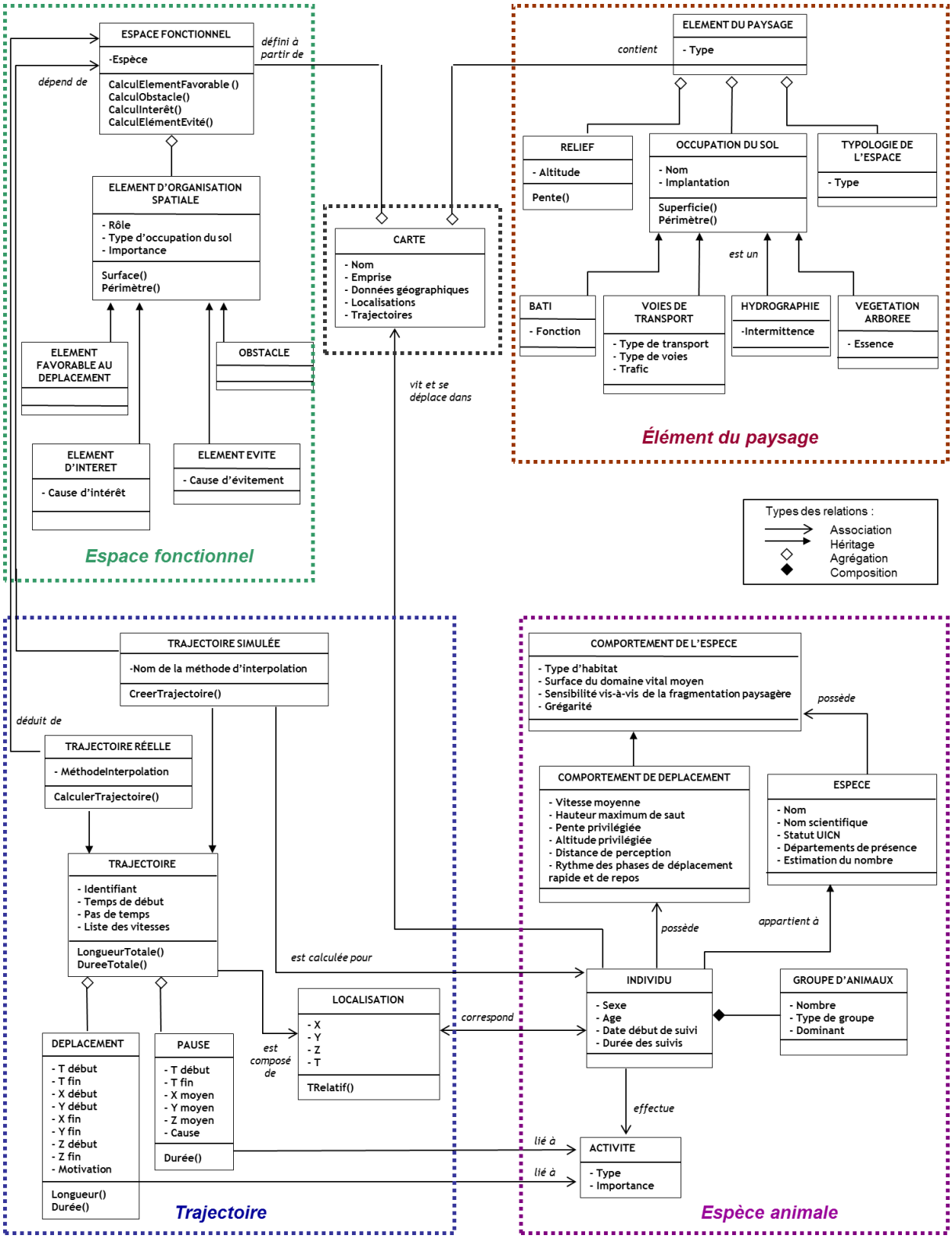


Figure IV.6. Le modèle de données orienté objet. Les concepts en jeu et les relations sont détaillés pour les déplacements des espèces animales et l'influence de l'espace.

- La classe *typologie de l'espace* définit une nomenclature sur les occupations du sol en fonction de la présence et de l'homogénéité de celles-ci (zone urbaine, zone de cultures, etc.). Nous avons utilisé dans les analyses de données la base CORINE Land Cover qui est à moyenne échelle spatiale. Cette description de l'espace est intéressante afin de prendre en compte les préférences d'habitat des espèces animales. Nous définissons cette classe conceptuellement, même si nous ne l'avons pas explicitement exploitée lors de nos simulations des déplacements.

- Les classes d'*occupation du sol* sont ponctuelles, dans le sens de discontinues. Elles décrivent les éléments du paysage selon leur géométrie et peuvent être d'implantation ponctuelle (point d'intérêt localisé par exemple), linéaire (route) ou surfacique (bois). En plus du type d'élément du paysage, les surfaces sont caractérisées par leur superficie et leur périmètre et les éléments linéaires par leur longueur. Nous reprenons les données de la BD TOPO® pour la description des occupations du sol, qui sont donc à grande échelle spatiale.
Quatre classes héritent de la classe *occupation du sol*. C'est le *Bâti* qui peut être distingué selon l'attribut sur leur fonction : habitation, bâtiment administratif, locaux industriels. Les *Voies de transport* couvrent plusieurs types de transport dont ferroviaire, routier, cycliste, pédestre. Les types de voies donnent les caractéristiques physiques des voies. Par exemple pour les routes, il peut s'agir de voies à 1 ou 2 chaussées. Pour les voies ferrées, les lignes sont soit à grande vitesse ce qui suppose un aménagement des bas-côtés différent par rapport aux autres lignes. Les voies pédestres peuvent soit être des chemins ou des sentiers, ces derniers étant plus étroits. L'*Hydrographie* contient les plans d'eau et les cours d'eau. Ceux-ci peuvent être permanents ou intermittents selon la période de l'année. Enfin la *Végétation arborée* est issue de la BD TOPO®. Elle peut être déclinée pour quelques départements selon les essences forestières principales. La base Carte Forestière fournit aussi un détail des essences forestières.

  - L'*Espace fonctionnel*

L'espace fonctionnel est une interprétation des éléments du paysage en fonction du comportement d'une espèce animale, selon ses besoins et ses capacités de déplacement. Cet espace peut être précisé selon le comportement d'un individu en particulier. Il est défini à partir des éléments du paysage contenus dans la classe *Carte*. Nous avons également relié cet espace aux déplacements car celui-ci peut être en partie déduit des observations d'utilisation et de parcours des éléments du paysage par les animaux, et il influence la construction des trajectoires simulées. L'espace fonctionnel est composé d'*Élément d'organisation spatiale* qui correspond à l'un des quatre rôles définis dans la partie IV-1.1 :

- les *Éléments favorables au déplacement*, qui facilitent les déplacements des animaux ;
- les *Obstacles* freinant ou gênant les déplacements ;
- les *Éléments d'intérêt* qui ont un attribut sur la cause de cet intérêt, par exemple la présence d'une ressource alimentaire, ou un lieu favorable au repos ;
- les *Éléments évités* qui ont aussi un attribut sur la cause de l'évitement, pouvant être qu'une occupation du sol n'est pas propice à la survie d'une espèce.

À partir de nos cas d'étude, les connaissances concernant l'espace fonctionnel sont organisées en Figure IV.7. Nous avons repris ces cas par espèce et par milieu dans lequel les suivis ont été réalisés.

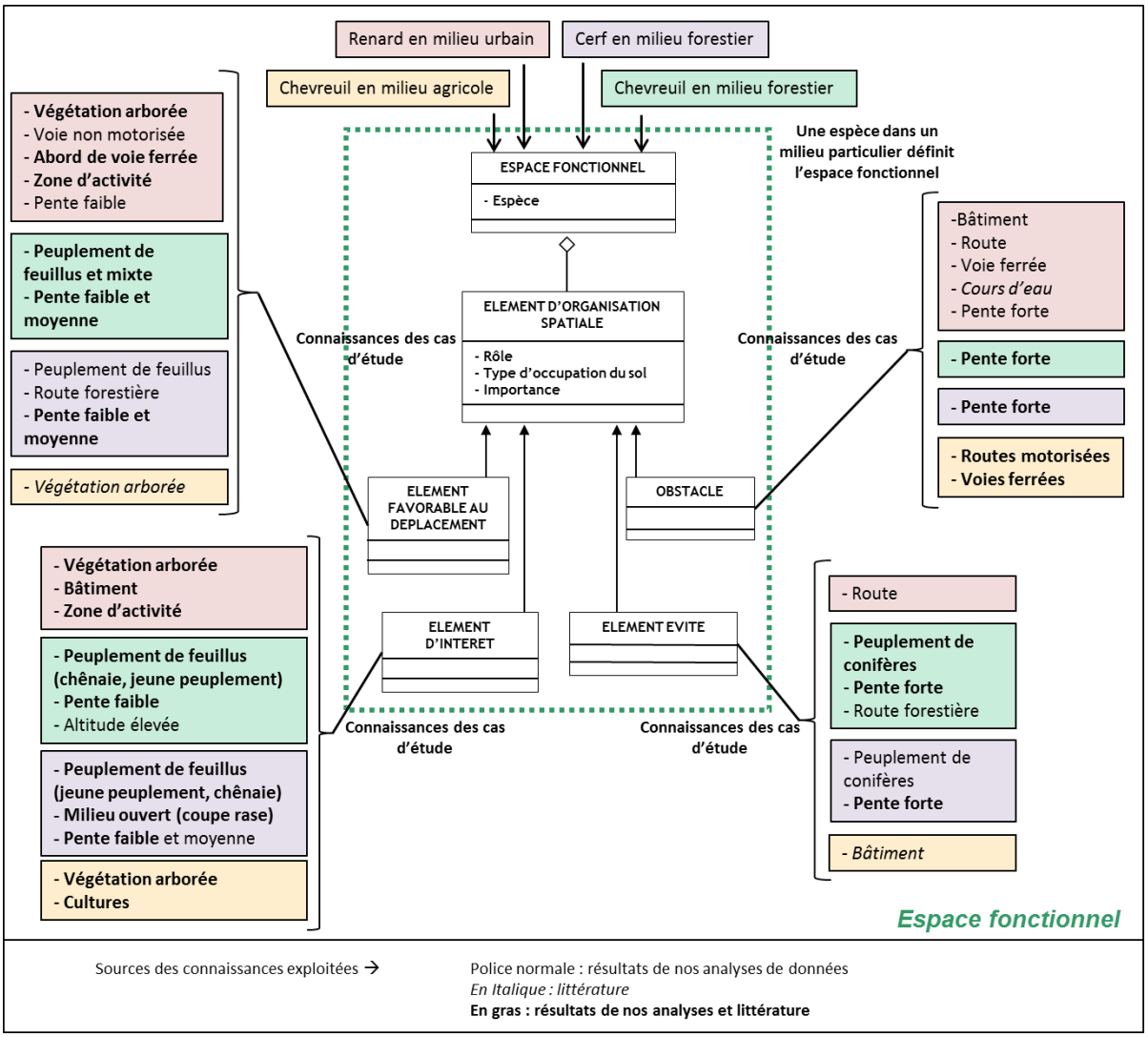


Figure IV.7. Les connaissances sur l'espace fonctionnel à partir des analyses des cas d'étude du chapitre III et de la littérature. La symbolisation est définie par cas d'étude pour les connaissances rattachées aux concepts du modèle de données.

- Les classes des espèces animales

Ces classes concernent les animaux et leurs comportements. Nous avons sélectionné les informations intéressantes afin d'analyser et de simuler les déplacements des animaux. Les classes sont définies comme suit.

- Les classes *Individu* et *Groupe d'animaux*

Un individu est un animal correspondant à une espèce, mâle ou femelle, avec un certain âge à un instant t. Les attributs de date et de durée des suivis de l'animal se réfèrent aux informations sur les données récoltées sur un animal, dans notre cas lors de l'enregistrement des localisations par télémétrie.

Un groupe d'animaux représente un regroupement de plusieurs individus (attribut nombre). Le type de groupe peut être permanent ou temporaire. Une hiérarchisation sociale entre les individus existe (notion d'individu dominant). Parmi les espèces de nos cas d'étude, l'espèce qui a le plus fort comportement grégaire est le cerf car les biches vivent en harde. Nous avons pu par ailleurs constater que deux des biches dans l'échantillon de données de l'ONCFS, appartiennent vraisemblablement à la même harde car elles se suivent. Les autres espèces connaissent des associations temporaires entre individus, en particulier entre une femelle et sa portée.

- Les classes *Espèce* et *Comportement de l'espèce*

Un individu appartient à une espèce. Cette dernière classe contient des informations sur le nom usuel et le nom scientifique, et le statut des menaces pesant sur l'espèce au niveau mondial (classement UICN). Au niveau de la France, le statut peut être celui d'une espèce nuisible définie par département. Nous avons ainsi ajouté si l'espèce est présente dans les départements français. Ce découpage administratif permet également de connaître les lieux d'habitat des espèces et peut faire l'objet d'études sur la densité de population. Dans nos cas d'étude, les trois espèces sont communes à tous les départements, sauf pour les cerfs présents dans la moitié d'entre eux.
La classe sur le comportement de l'espèce contient des connaissances générales. Elles sont issues de la littérature. Il s'agit du type d'habitat dans lequel l'espèce est présente (urbain, forestier, agricole). La surface du domaine vital estimé donne une indication sur l'espace dont nécessitent les animaux pour vivre. La sensibilité à la fragmentation paysagère regroupe les informations sur l'adaptation de l'espèce aux modifications de son habitat, notamment la modification par l'apparition d'obstacles aux déplacements. Cet attribut prend en compte la capacité de l'espèce à s'adapter, et donc son aspect généraliste ou non. L'attribut de grégarité indique si les populations d'une espèce grégaire sont organisées en groupes d'animaux permanents (dans ce cas, représentés par la classe *Groupe d'animaux*).

- La classe *Comportement de déplacement*

Les comportements de déplacement concernent un individu et sont liés aux capacités de l'espèce donc à leur comportement. Il s'agit de la vitesse moyenne de déplacement, de la hauteur de saut, des valeurs de pente et d'altitude sur lesquelles l'animal se déplace, de la distance de perception correspondant à la distance à partir de laquelle les éléments du paysage ont une influence sur l'animal. Cette dernière distance dépend de plusieurs facteurs, notamment de l'élément du paysage considéré et du voisinage spatial. L'attribut sur le rythme d'alternance entre phases de repos et phases de déplacement rapide est lié à la classe suivante *Activité* car le type de mobilité est en fonction de l'activité effectuée par un individu. Les connaissances sur les comportements de déplacement sont issues à la fois des analyses de données (vitesse moyenne, rythme de déplacements) et de la littérature (hauteur de saut). La distance de perception est un attribut davantage théorique et fait l'objet d'hypothèses sur sa valeur. Cette notion fait intervenir plusieurs paramètres comme la présence d'éléments du paysage et de personnes, le bruit, la luminosité. Cette distance peut varier entre différents environnements spatiaux, et les capacités et l'état physique d'un individu.

- La classe *Activité*

Les activités correspondent aussi à un individu. Ces activités sont la traduction de ses besoins et sont définies selon une période de temps. L'attribut type désigne le type d'activités : journalière par exemple comme le repos ou la recherche de nourriture, ou alors annuel comme une migration. L'attribut d'importance désigne si la nécessité de réaliser l'activité est grande ou non.

Nous indiquons en Figure IV.8 les connaissances portant sur les animaux, au niveau de l'espèce et au niveau individuel, ceci en s'appuyant sur nos cas d'étude.

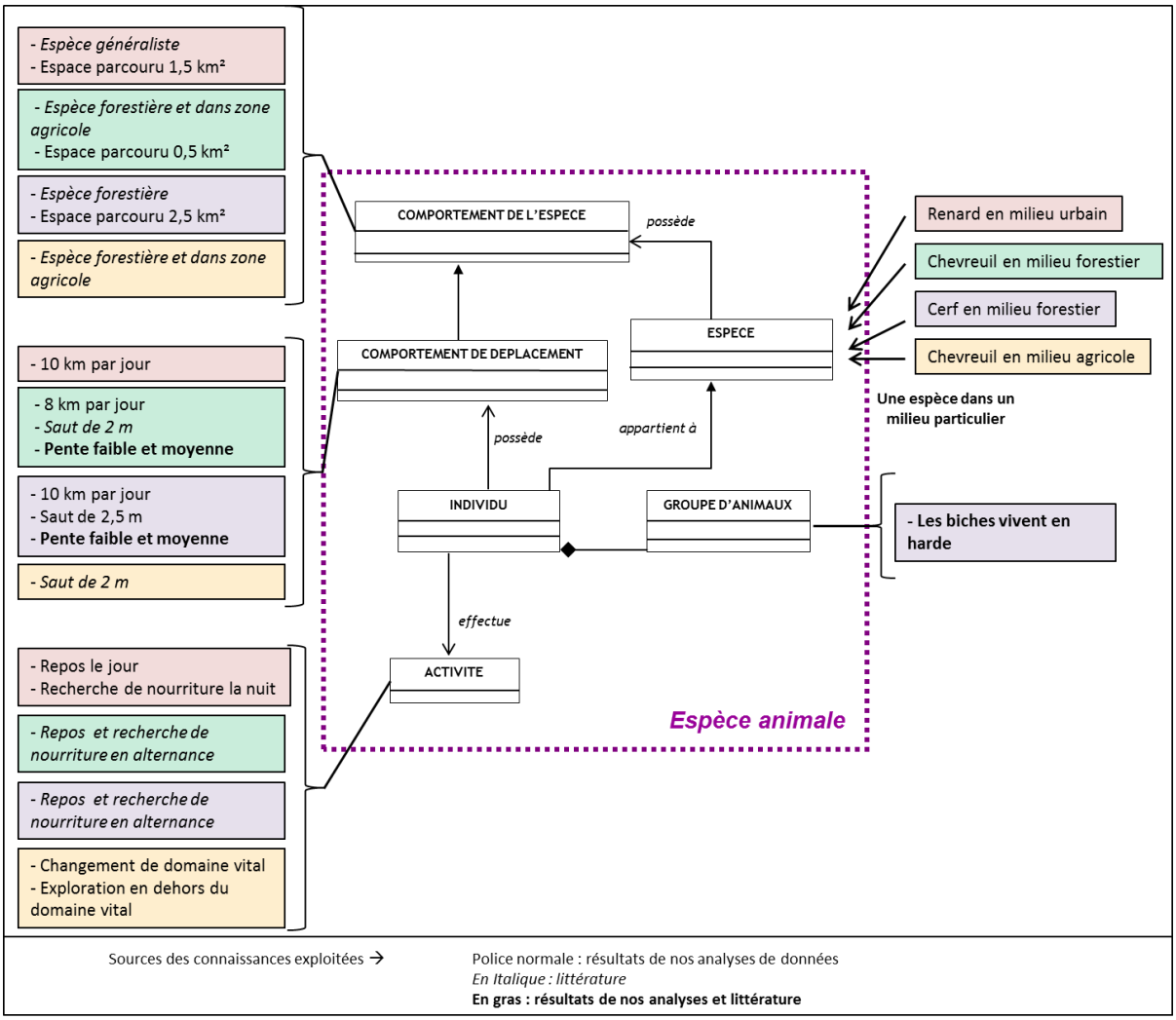


Figure IV.8. Les connaissances sur les espèces animales intégrées au modèle de données et issues des analyses du chapitre III et de la littérature.

- Les classes des déplacements

Le dernier groupe de classes concerne les déplacements, connus ou simulés pour un animal.

- La classe *Trajectoire* et *Localisation*

Une trajectoire est définie par une suite d'objets *Localisation* (attributs : x, y, z et t ainsi qu'un temps relatif si l'on considère la durée par rapport au début de la trajectoire considérée). Une trajectoire est un objet linéaire. Elle a un identifiant unique, un temps initial, un pas de temps correspondant à l'intervalle de temps entre deux localisations connues, une liste des vitesses associées estimées. Sa longueur totale ainsi que sa durée peuvent être calculées.

- La classe *Déplacement* et *Pause*

Une trajectoire est segmentée selon des phases de *Déplacement* et des phases de *Pause* qui sont des périodes avec peu de mouvements. Ces deux classes sont reliées à la classe *Activité* (incluses dans le groupe des classes sur les espèces animales) qui permet de représenter les rythmes des animaux. Un déplacement est défini par des coordonnées spatiales et un temps initial et de fin. Il a une motivation (fuite, recherche de nourriture, exploration). Sa longueur et sa durée sont calculées. Une pause correspond à un temps initial et de fin (durée calculée) et à des

coordonnées moyennes du lieu où l'animal reste statique. La pause a une cause, par exemple se reposer, s'alimenter ou encore se cacher ou se protéger.

- La classe *Trajectoire réelle* et *Trajectoire simulée*

Les trajectoires définies appartiennent à deux catégories. Les T*rajectoires réelles* sont issues des observations : ce sont des suites de localisations enregistrées par télémétrie. Elles sont aussi définies par un objet linéaire (une trace géométrique) résultant d'une interpolation des localisations connues. Les T*rajectoires simulées* sont obtenues par simulation. Elles sont calculées pour un animal en prenant en compte les connaissances et des hypothèses sur son comportement. Elles dépendent aussi de l'espace dans lequel l'animal est situé et ainsi de l'espace fonctionnel.

Le modèle de données est défini selon une conception théorique mais il intègre aussi des connaissances acquises sur des cas particuliers. Il organise les notions attribuées à l'influence de l'espace sur les déplacements. Nous avons mis en avant l'espace vécu par les animaux lors de leurs déplacements. Le modèle permet une lecture plurielle de l'espace : un même élément peut avoir plusieurs fonctions selon l'espèce et l'individu, selon l'heure de la journée et la période de l'année, selon les caractéristiques du site d'étude. L'étape suivante de notre méthodologie est d'implémenter un modèle de simulation, ceci afin de pouvoir lancer des trajectoires et évaluer l'effet de modifications spatiales.

2) PROPOSITION D'UN MODÈLE DE SIMULATION DES DÉPLACEMENTS D'ANIMAUX

La simulation permet de tester des hypothèses concernant les facteurs qui jouent un rôle sur la forme des déplacements d'animaux et sur leurs chemins empruntés, ainsi que d'étudier les effets d'aménagements sur les déplacements. Nous effectuons dans un premier temps un choix pour l'implémentation d'un modèle de simulation en nous appuyant sur la bibliographie. Nous décrivons ensuite les comportements des animaux que nous avons pris en compte dans le modèle. Nous définissons pour cela les propriétés qui nous semblent pertinentes pour construire des trajectoires selon les espèces et selon l'influence des éléments du paysage d'après les résultats des analyses de données du chapitre III et d'après la littérature. Puis, la mise en œuvre de l'implémentation est présentée avec les choix logiciels. Nous analysons alors la sensibilité du modèle aux valeurs des paramètres, à l'aide de tests de lancement de simulation des trajectoires. En Figure IV.9, notre démarche générale de proposition d'un modèle de simulation de trajectoires d'animaux est présentée.

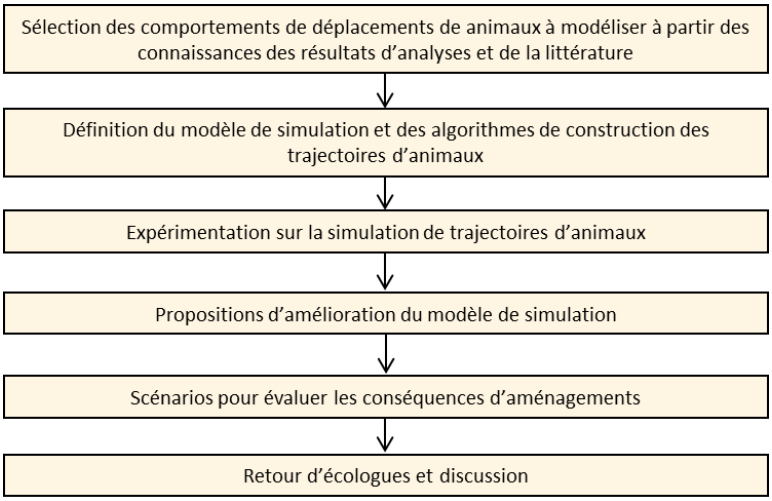


Figure IV.9. Schéma de la démarche de proposition d'un modèle de simulation de déplacements d'animaux.

2.1. L'approche agent : applications existantes et positionnement

Plusieurs travaux utilisent la modélisation et la simulation de faits dynamiques. Nous en présentons quelques-uns impliquant la faune ou l'étude de déplacements. Différentes méthodes peuvent être utilisées afin de modéliser les phénomènes spatio-temporels comme les déplacements. Une stratégie peut consister à modéliser les contraintes spatiales qui influencent les déplacements. La recherche d'une résolution optimale de l'ensemble de ces contraintes peut s'inscrire dans les problèmes de satisfaction de contraintes. Elle s'appuie alors sur des hypothèses et sur une modélisation préalable des contraintes. Lorsque la modélisation est individu-centré, cela signifie que les éléments que l'on souhaite étudier sont les entités individuelles considérées de plus bas niveau dans le modèle (cela peut être un homme, un animal, un arbre, une voiture) avec des attributs et des actions réalisables. Les contraintes de l'environnement spatial ont une influence sur les individus et sur leurs actions.
Parmi les approches individu-centré, une des approches est dite orientée agent. La modélisation par agent permet de considérer les entités intervenant dans un système et de leur attribuer des

comportements propres et des interactions avec les autres entités. Ferber (1995) définit un agent comme une :

> « entité physique ou virtuelle qui est capable d'agir dans un environnement, qui peut communiquer directement avec d'autres agents, qui est muée par un ensemble de tendances […], qui est capable de percevoir […] son environnement, […], dont le comportement tend à satisfaire ses objectifs, en tenant compte des ressources et des compétences dont elle dispose, et en fonction de sa perception, de ses représentations et des communications qu'elle reçoit ».

Nous reprenons cette définition afin de modéliser les individus dont nous souhaitons simuler le déplacement tout en prenant en compte l'influence des éléments du paysage. Le principe des systèmes orientés agent et notamment des systèmes multi-agents (SMA) s'appuie sur la conceptualisation des agents. Dans Briot & Demazeau (2001), un SMA correspond à un :

> « système distribué composé d'un ensemble d'agents […] [dans lequel] chaque agent a des informations ou des capacités de résolution de problèmes limitées (ainsi, chaque agent a un point de vue partiel) ».

Les SMA sont utilisés afin de représenter les interactions entre différentes entités avec des comportements particuliers. Ils peuvent être assimilés aux approches bottom-up qui permettent de mettre en évidence des phénomènes émergents. C'est par exemple le cas lorsque des déplacements de personnes considérées individuellement font ressortir des flux de mouvement. Les agents peuvent correspondre à des entités physiques ou abstraites, par exemple des personnes (Mathieu *et al.*, 2001 ; Müller & Aubert, 2012), des véhicules (Lammoglia *et al.*, 2013), des éléments de l'espace (Ruas, 1999) ou des occupations du sol (Gangat *et al.*, 2009), des composants de systèmes énergétiques (exemple d'une pile hybride dans Lagorse, 2009). Le niveau microscopique se positionne entre le niveau nanoscopique qui formalise les mécanismes internes des agents (par exemple la physiologie d'un animal), et les niveaux mésoscopique et macroscopique qui représentent peu ou pas du tout les entités individuelles mais s'intéressent à des fonctionnements généraux, par exemple les flux de personnes sans formaliser explicitement le comportement de chacun mais en intégrant le nombre de passages dans un lieu.

2.1.1. Les applications orientées agent en écologie

Dans notre thèse, nous nous intéressons à la capacité de déplacement des animaux considérés individuellement et à leurs réactions face aux éléments du paysage. Dans la plupart des applications en écologie, les études portent sur les populations animales et sur les individus dont les actions ont des répercussions sur leur population et sur l'environnement spatial. Pour ces applications, les SMA peuvent être appropriés. Bousquet *et al.* (2002) rappellent les applications principales des SMA, qui sont individus-centrés, en écologie : l'analyse des structures et des dynamiques de populations animales et végétales, la recherche des causes des différences interindividuelles, l'étude de l'équilibre des systèmes à plusieurs composantes comme les écosystèmes. L'espace n'est pas uniquement un support mais il est caractérisé par ses relations avec les entités qui vivent dans cet espace (homme, animal).

Les relations espace/espèce/société

Les SMA sont largement utilisés pour analyser des systèmes complexes où des acteurs différents interviennent. Les SMA ont été appliqués dans l'analyse des interactions entre la faune et la société dans les situations où un espace commun est exploité. C'est par exemple le cas dans des études sur les changements d'occupation du sol, qui peuvent être la conséquence d'actions de la faune en même temps que ces changements peuvent avoir une influence sur la présence de cette même faune. Dans l'état de l'art (cf. chapitre I), nous avions mentionné les situations qui pouvaient engendrer des conflits entre la faune et les personnes. Il peut s'agir par exemple de conflits entre la faune d'élevage et la faune sauvage dans l'exploitation des pâturages. Les SMA permettent de lancer des simulations sur l'évolution de la quantité des ressources, en prenant

en compte l'occupation du sol et les pratiques spatiales des habitants ainsi que les dynamiques et les déplacements de la faune sauvage (Musiani *et al.*, 2010 ; Anwar *et al.*, 2007 ; Zunga *et al.*, 2000). Nous retrouvons également l'utilisation des SMA dans les études de l'exploitation de l'espace par la faune. Dans Mechoud *et al.* (2000) par exemple, le comportement alimentaire et l'utilisation de l'espace de troupeaux de bovins et de chevaux sont modélisés afin de mieux comprendre les dynamiques de la végétation des pâturages et de mieux les gérer dans un objectif d'entretien des paysages. Pour les interactions entre les animaux, les relations sociales et hiérarchiques peuvent aussi être modélisées par approche agent, par exemple dans les groupes de primates dans Bryson *et al.* (2007).
Concernant les espèces animales uniquement, les questionnements s'attachent en particulier à leur rôle respectif et à leurs relations dans les écosystèmes. Les études sur les populations animales concernent leurs dynamiques : les animaux pris en compte appartiennent à une ou plusieurs espèces dans un site délimité. La répartition des espèces en fonction des caractéristiques environnementales est par exemple étudiée par approche agent dans Topping *et al.* (2003). Dans ce travail, les relations entre les populations et le paysage sont considérées à travers la sélection d'un espace de vie par les animaux selon des préférences de types d'habitat.

Les déplacements des animaux

Les SMA permettent de prendre en compte des comportements individuels en tant qu'approche individu-centré (Railsback, 2001). Cela permet de modéliser les déplacements d'un animal en fonction de son environnement spatial et social. La modélisation par agent constitue alors un cadre formel orienté objet qui peut intégrer plusieurs méthodes et fonctions, notamment dans notre cas pour la construction de trajectoires. Ces méthodes concernent la définition de l'environnement spatial dans lequel évolue un animal. Dans Note & Poix (2006), une carte de probabilité de présence de petits prédateurs, dont le renard roux lors de la chasse, est créée en prenant en compte des éléments du paysage tels que les haies et les bosquets. Dans Vuillemier & Metzger (2006) et La Morgia *et al.* (2011), le paysage est modélisé en prenant en compte les caractéristiques des éléments du paysage et leur influence. Dans le premier article, l'espace est modélisé sous format vecteur permettant la prise en considération de chaque élément du paysage. Les déplacements de dispersion des animaux à partir d'un lieu initial sont construits en prenant en compte les préférences d'habitat des espèces car un animal va plutôt s'installer dans un habitat favorable. L'action de déplacement par un animal est déviée par des obstacles qui peuvent l'éloigner d'une zone d'habitat favorable initialement proche. Dans le second article (La Morgia *et al.*, 2011), l'espace consiste en une grille associée à des coûts de déplacement. Les méthodes concernent également la construction des trajectoires, c'est-à-dire comment est construit l'objet représentant le déplacement. Coulon *et al.* (2010) partent de la méthode des chemins de moindre coût et l'adaptent à la faune en prenant en compte la corrélation entre les directions de déplacement et en limitant la perception des animaux à l'environnement spatial proche. Comme vu dans le chapitre I, certains travaux utilisent les fonctions de marches aléatoires ou de mouvements browniens afin de reproduire des formes de trajectoires s'approchant des observations (Miller & Maude, 2010 ; Bartumeus *et al.*, 2005). Hooten *et al.* (2010) proposent d'employer des fonctions statistiques de simulation de trajectoires. Ils y intègrent des connaissances sur les rythmes des déplacements des animaux et leur utilisation de l'espace. Ces fonctions sont intégrées dans une modélisation générique agent.
Nous trouvons d'autres exemples dans la littérature de l'utilisation des SMA pour étudier les déplacements au-delà du cadre de l'influence de l'espace sur les déplacements. La validité des techniques d'observation a été testée afin de dénombrer le nombre d'individus : estimation du différentiel entre la réalité et l'estimation par une technique de dénombrement, représentativité de l'échantillonnage, comparaison entre les techniques de dénombrement. Par exemple,

Varaillon (1998) étudie les imprécisions des méthodes de transect pour dénombrer les animaux, où l'observateur ne reste pas statique pendant les suivis : le rôle du paysage et l'emplacement de l'observateur sont entre autres modélisés. Le modèle MANTA est un exemple de modélisation et de simulation par agents, dédié aux trajectoires de fourmis, notamment sous l'influence de phéromones (Treuil *et al.*, 2008). Maes (1991) modélise les activités des animaux qui sont potentiellement compétitives – par exemple recherche de nourriture et fuite devant un prédateur – et qui les amènent à prendre des décisions et à favoriser certaines actions. À l'image du projet MIRO (2006), concernant les déplacements de personnes, la modélisation par agents permet de décrire les facteurs influençant les déplacements d'animaux via une formalisation des comportements individuels et ceci afin d'étudier l'émergence de mouvements collectifs et au niveau de la population. Nous résumons en Figure IV.10 les thèmes de travaux utilisant les SMA pour étudier des problématiques liées à la faune par sujet d'intérêt.

SUJETS ÉTUDIÉS →	Faune/Société humaine	Les espèces animales	Les populations animales	Les individus
QUESTIONNEMENTS →	- Évolution de l'occupation du sol en lien avec la faune sauvage et d'élevage	- Rôle dans le fonctionnement des écosystèmes	- Dynamiques de la composition d'une population	- Déplacement journalier et de dispersion
	- Gestion des ressources issues des écosystèmes	- Répartition spatiale	- Dénombrement	- Relations sociales et interindividuelles
	- Analyse des situations de conflit		- Sélection de l'habitat	

Figure IV.10. Organisation des thèmes de travaux utilisant une modélisation orientée agent sur les questionnements liés à l'écologie et en particulier sur la faune.

Nous avons organisé les études par approche agent en fonction des sujets d'intérêt : interaction faune et société, les espèces animales, des populations particulières d'une espèce animale, les animaux considérés individuellement. Les thèmes de recherche sur les animaux concernent différentes entités : les espèces animales sauvages ou domestiquées, les populations animales (animaux d'une même espèce évoluant dans un lieu géographique commun) et les individus (cf. chapitre I-2).

2.1.2. Nos choix de modélisation en approche agent

Choix du type de modélisation agent

Notre choix s'est porté sur l'approche agent afin de construire des trajectoires et de prendre en compte l'influence du paysage. Cette approche permet de formaliser des entités indépendantes ainsi que leurs comportements. Nous avons choisi une modélisation orientée agent et non multi-agents car nous étudions le déplacement d'un animal (agent) dans un espace. Nous ne nous intéressons donc pas à des flux d'individus mais à des déplacements individuels. Une modélisation agent nous permet :

- de représenter des connaissances de diverses natures sur les animaux, leurs comportements et leurs déplacements dans un espace ;
- de formaliser des comportements de décision que nous souhaitons intégrer concernant les choix de déplacements des animaux.

Les aspects considérés dans notre modèle sont les agents et l'environnement spatial. Par contre, les interactions entre agents et l'organisation des agents ne sont pas prises en compte, si l'on reprend les composantes de l'approche de Demazeau (2003) dans Bernon *et al.* (2009). Les

interactions ponctuelles et les relations hiérarchiques entre les animaux ne font pas partie de nos préoccupations. Les connaissances que nous utilisons dans le modèle se rapportent aux comportements individuels des animaux dans les aspects décisionnels du modèle, et aux comportements hérités de leur espèce dans la définition des besoins, des activités et des préférences spatiales de l'animal. Nous nous focalisons sur les relations entre les individus et les éléments du paysage. La modélisation de l'environnement spatial est donc centrale. Les approches agent peuvent modéliser les entités de l'espace par des agents avec des comportements propres, comme cela peut être le cas si l'on considère la végétation à un niveau local. Dans notre cas, les éléments du paysage n'ont pas de comportements propres qui les font évoluer mais ils peuvent influencer les décisions des agents. Ils ne sont par contre pas modifiés suite à une action exercée par un agent qui se déplace à l'intérieur ou à proximité. Notre représentation de l'espace est celle de l'environnement dans lequel se déplacent et vivent les animaux. Cet environnement a des conséquences sur les chemins empruntés à travers les rôles des éléments du paysage que nous avons caractérisés précédemment. La présence d'obstacles et d'éléments favorables modifie les trajets, qu'ils soient dirigés vers un objectif fixé ou non. Les éléments d'intérêt dirigent les déplacements en attirant les animaux et les éléments évités sont peu parcourus.
L'approche agent nous semblait particulièrement adaptée afin de simuler les trajectoires des animaux dont les comportements et les choix de déplacement sont soumis à des hypothèses. Dans la modélisation, les déplacements sont construits pour un individu. Ils sont le résultat de leur appréhension des éléments du paysage. Un agent animal possède un but qui est d'aller de sa localisation actuelle à une destination. Il calcule une trajectoire, représentant son chemin, grâce à ses connaissances sur les éléments du paysage contenus dans l'environnement agent et grâce à sa perception locale. Les agents ont des activités qui les motivent à se déplacer ou à rester statiques. L'activité détermine aussi la destination que l'agent doit atteindre.
Ce choix d'une modélisation orientée agent nous permet d'intégrer les comportements des animaux intervenant dans les choix de déplacements dans un environnement spatial. Ceci ouvre des perspectives d'enrichissement des variables influençant les déplacements comme les interactions entre les individus, qui dans ce cas seraient intégrées à un système multi-agents.

Le type d'agent et la définition de leur environnement

Nous définissons à présent quel type d'agent nous utilisons dans notre modèle. Il est également nécessaire de définir de quelle manière les données géographiques sont prises en compte pour décrire l'environnement agent. L'agent est un animal : il est localisé dans un espace et il perçoit partiellement son environnement spatial. Il construit ses déplacements, motivés par un but et dépendant de ses activités, de son comportement et de sa perception de l'espace, comme résumé en Figure IV.11.

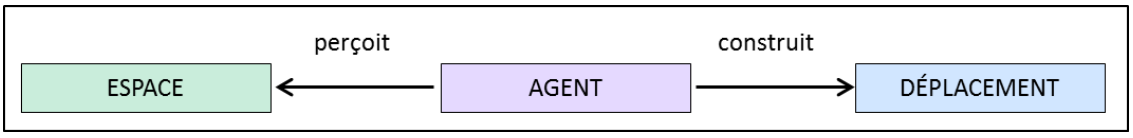


Figure IV.11. L'agent perçoit partiellement son environnement spatial et s'y déplace.

Les agents sont situés : ils sont localisés et ont donc des coordonnées spatiales. Notre modélisation se place au niveau microscopique : elle s'intéresse aux propriétés des animaux et à leur comportement. Elle définit la perception de l'environnement par les animaux et leurs déplacements dans cet environnement. Les animaux mènent des actions, dans notre cas l'action est celle de se déplacer sur l'espace contraint et selon un certain rythme. Briot & Demazeau

(2001) mentionnent deux grands types d'agents, réactifs et cognitifs. Les agents cognitifs sont associés à des mécanismes complexes de raisonnement. Les agents réactifs peuvent aussi avoir des processus de raisonnement mais ceux-ci sont moins poussés que pour les agents cognitifs. Ils réagissent à des évènements ou à des éléments physiques, suite à une phase d'interprétation. Ils attendent qu'un problème apparaisse pour élaborer une action en réponse, alors que les agents cognitifs prédiront et anticiperont davantage (Doniec *et al.*, 2006). L'exemple des agents réactifs donné dans la référence précédente est celui des colonies de fourmis qui répondent à des stimuli et qui adaptent ensuite leurs déplacements. La distinction entre agents réactifs et cognitifs n'est cependant pas exclusive et il s'agit plutôt d'un continuum dans la considération de l'intelligence des agents. Les aspects importants des agents concernent leur situation par rapport à un environnement, leur autonomie qui leur permet de contrôler leurs actions et leur flexibilité qui les rend capables de s'adapter (Briot & Demazeau, 2001). Dans notre modèle, les agents animaux n'agissent pas que par réflexe en répondant à des évènements. Ils ont des capacités cognitives et répondent aux propriétés suivantes.

- Ils sont situés. Ils connaissent leur situation dans l'espace par rapport aux éléments du paysage et au-delà d'une perception visuelle directe. Les agents ont des besoins et des capacités. Ils prennent des décisions pour modifier leur situation dans l'espace notamment pour utiliser ou pour éviter les éléments du paysage.
- Ils ont une capacité de mémorisation car ils reconnaissent les lieux qu'ils ont déjà traversés. Lorsque les agents explorent un nouveau territoire, ils ne connaissent pas les lieux et ont donc une perception locale. Ils connaissent par contre mieux la répartition des éléments du paysage dans leur domaine de vie.
- Ils sont autonomes. Ils ont des activités qui leur sont propres et ils prennent la décision de se déplacer ou de rester statiques sans être contraints par un évènement, mais en assimilant cet évènement et en décidant de s'arrêter ou non.
- Ils sont flexibles car ils peuvent adapter leurs comportements. Si les agents ont choisi une destination qu'ils mettent trop de temps à atteindre, ils peuvent y renoncer et modifier leur destination. Ils ont également une certaine souplesse dans l'appréhension des éléments du paysage. Les obstacles aux déplacements peuvent quand même être traversés et les animaux ne suivent pas toujours des éléments favorables aux déplacements.

La cognition peut se rapporter au concept des cartes mentales dont nous avions parlé dans le chapitre I : avec ce type d'agents, les animaux ont une représentation de leur environnement indépendamment de leur perception visuelle immédiate. Le rôle de la mémoire est important ainsi que celui de l'abstraction des éléments de l'espace et de leur position les uns par rapport aux autres. Bousquet *et al.* (2002) soulignent que les agents sont des entités relationnelles, avec les autres agents ou avec leur environnement, et qu'ils ne sont donc pas de simples objets. Nous nous concentrons sur les relations entre les animaux et l'espace. L'espace est composé de lieux significatifs pour les agents et n'est pas un support neutre. Le temps joue un rôle important dans notre modèle. Il intervient d'abord dans la définition du pas de temps de simulation : les agents construisent leurs trajectoires par leurs localisations successives séparées par une durée prédéfinie. Le temps impose également une différenciation dans les comportements des agents : leurs activités dépendent de la période de la journée et ils se déplacent pendant des périodes limitées.

2.2. La définition des agents et de leur environnement spatial dans notre modèle

Nous établissons les comportements des agents permettant de simuler des déplacements dans un espace. Les agents ont des propriétés qui correspondent à des capacités et des

comportements qui se traduisent en actions, notamment dans notre cas en type de mobilité. La Figure IV.12 montre ce qu'on voudrait que l'agent animal réalise. Les étapes modélisées sont :

(a) l'agent est situé et connaît sa position ;
(b) il perçoit son environnement spatial ;
(c) l'agent choisit une destination correspondant à un type d'occupation du sol en fonction de son activité du moment. Nous verrons plus loin que nous avons limité les activités à deux types : le repos (l'agent reste où il est) et la recherche de ressources notamment alimentaires (l'agent choisit une destination dans un rayon de perception à paramétrer) ;
(d) l'agent se déplace vers cette destination ;
(e) l'agent parcourt le lieu de destination s'il s'agit d'une occupation du sol surfacique (par exemple une zone arborée) ou ses alentours s'il s'agit d'un élément dont l'intérêt se situe à proximité (par exemple un bâtiment). Le parcours de la destination représente l'exploitation de la destination dans le cadre de l'activité de l'individu : repos ou recherche de ressources.

Une fois la destination atteinte et parcourue, l'agent revient à l'étape (a) et choisit une nouvelle destination.

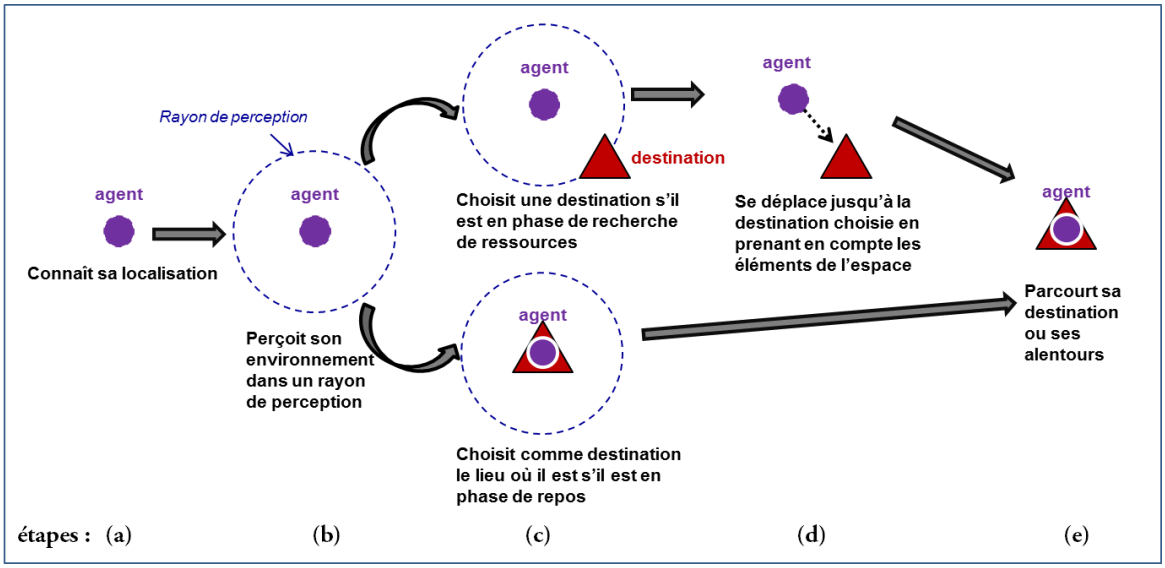


Figure IV.12. Les comportements agent modélisés par notre modèle correspondant au déplacement d'un animal.

Deux types de composantes sont à déterminer : les propriétés des agents et leurs comportements, puis les paramètres de simulation qui encadrent la construction des trajectoires comme la prise en compte de l'espace dans les déplacements. Notre objectif est ensuite de pouvoir évaluer l'effet d'aménagements du territoire sur les déplacements de plusieurs espèces animales. Nous nous plaçons pour cela dans un contexte de modélisation de déplacements journaliers. Le modèle ayant pour but de visualiser les chemins empruntés par les agents en fonction de la configuration d'un site d'étude, nous avons privilégié une représentation des déplacements à des vitesses relativement grandes, peut-être au détriment du respect des phases de repos et des pauses lors de déplacements.

2.2.1. Les propriétés et les comportements des agents

Pour que l'agent effectue des déplacements, nous déterminons leurs propriétés et leurs comportements possibles. Un agent hérite de la classe *Individu* du modèle défini en Figure IV.6.

Il hérite donc aussi des comportements de son espèce. Nous manipulons des agents animaux. Chaque agent animal possède des caractéristiques propres (espèce, âge) qui sont susceptibles d'influencer les déplacements. Les propriétés des agents sont modélisées par des attributs que nous représentons dans la classe *Agent-Animal* avec le formalisme UML en Figure IV.13. Les comportements sont listés à la suite des propriétés sous forme de fonctions. Nous limitons les espèces animales prises en compte à celles de nos cas d'étude (renard, chevreuil, cerf). Nous souhaitons toutefois que les attributs restent adaptables à des espèces avec des comportements différents.

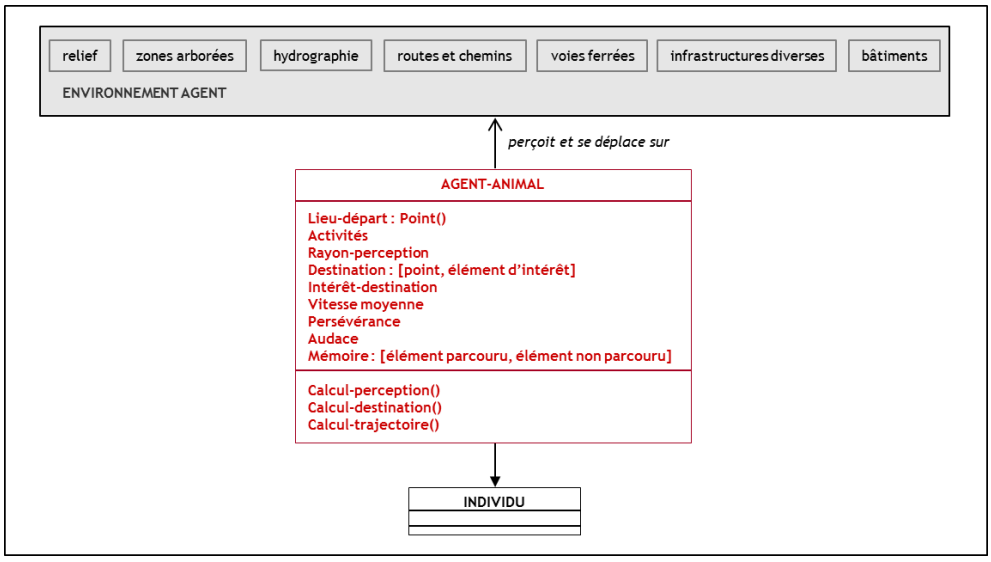


Figure IV.13. Les attributs d'un agent qui hérite de la classe *Individu* et qui est associé à l'environnement spatial par sa perception et son action de déplacement.

- Les propriétés

Les propriétés correspondant aux attributs de la classe *Agent-animal* sont décrites ci-dessous. Elles correspondent à des attributs définis dans le modèle de données en Figure IV.6. Nous associons à chaque propriété les connaissances auxquelles elles se rapportent et que nous intégrons dans notre modèle. Les connaissances sont issues de la littérature et des résultats d'analyses de données qui ont été menées de manière synchrone avec la définition et l'implémentation du modèle agent de simulation. Tous les résultats présentés dans le chapitre III n'ont pas été intégrés, d'une part parce qu'ils n'étaient pas encore validés et d'autre part parce que nous souhaitions pouvoir tester des simulations de déplacements dans un système pas trop complexe. Cette démarche a pour but d'identifier facilement les aspects du modèle à améliorer et à partir de là, de proposer des enrichissements.

- Le lieu de départ : l'agent possède une position initiale et il construit sa trajectoire depuis ce point.

→ Les connaissances liées : le lieu de départ se situe dans des sites parcourus par les espèces respectives, qui correspondent pour les cervidés à des milieux faiblement urbanisés, et pour le renard à des milieux divers (agricole, boisé, périurbain).

- Les activités : deux activités sont considérées, le repos et la recherche de ressources. Le repos correspond à des déplacements sur de courtes distances, dépourvus de l'objectif d'aller vers une nouvelle destination. L'activité de recherche de ressources comprend une partie exploration pendant laquelle l'agent sélectionne un lieu d'intérêt et cherche à l'atteindre, suivie

d'une partie exploitation de ce lieu. Nous incluons dans le terme de ressources, les ressources alimentaires et les lieux de repos, même si nous ne distinguons pas explicitement les comportements en fonction du type de ressources. L'exploitation représente la consommation des ressources alimentaires ou une pause de l'animal (repos temporaire, cachette, protection) lors de ses déplacements. La phase de recherche de ressources est associée à des déplacements sur de plus longues distances et avec le but d'atteindre les destinations choisies. Les rythmes d'activités sont modélisés par espèce. Les activités sont alternées et sont attribuées par plage horaire. Nous nous focalisons principalement dans notre modèle de simulation sur les relations entre éléments du paysage et déplacements. Cependant, la prise en compte des rythmes de déplacements permet d'obtenir des comportements agent plus réalistes.
→ Les connaissances liées : les rythmes par défaut pour les renards sont le repos pendant la journée et la recherche de ressources pendant la nuit. Pour les chevreuils et les cerfs, les phases sont alternées pendant 24 h, avec des durées respectives par espèce égales à 1 h et à 6 h (Tableau IV.1). Ces rythmes d'activités peuvent être modifiés dans le système, par exemple si l'on souhaite modéliser les phases d'activités des renards davantage en alternance comme cela peut être le cas pour des renards en milieu rural.

Tableau IV.1. Les rythmes d'activités par défaut modélisés par espèce.

espèce	Heure de la journée																								
	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
renard																									
chevreuil																									
cerf																									

activité "recherche de ressources" activité "repos"

- Le rayon de perception : il s'agit de la distance maximale à laquelle l'agent perçoit l'environnement spatial. La perception est considérée comme une moyenne et elle est identique quelle que soit la direction même si les éléments du paysage peuvent diminuer cette distance.
→ Les connaissances liées : la valeur du rayon de perception fait objet d'une hypothèse car l'on ne connaît pas la perception exacte des animaux. Dans notre modèle, cette valeur reste fixe quels que soient l'environnement spatial et l'activité de l'agent.

- La destination : c'est le lieu de destination choisi par l'agent animal et qu'il a pour objectif d'atteindre. Cette destination est définie soit par un point soit par un élément du paysage correspondant à une occupation du sol d'intérêt et donc un thème géographique (par exemple une zone arborée sélectionnée parmi les objets du thème de la végétation). Les types d'éléments d'intérêt constituant les destinations potentielles dépendent de l'espèce animale.
→ Les connaissances liées : pour l'espèce renard, les thèmes de la destination sont {zone arborée, bâti} lors de l'activité de recherche de ressources, et {zone arborée} pour l'activité de repos. Pour les chevreuils et les cerfs, il y a uniquement le thème {zone arborée} quelle que soit l'activité. Lorsque les données étaient disponibles sur le département du site d'étude considéré, nous avons distingué les essences principales forestières définies dans la BD TOPO® {feuillus, conifères, mixtes}. Nous avons utilisé cette nomenclature des essences forestières afin de valider le fonctionnement de notre modèle de simulation avec une représentation de l'espace néanmoins pas trop diversifiée. L'utilisation de la nomenclature de la base Carte Forestière détaillant davantage les essences mais qui n'est pas disponible sur tous les départements, représente une perspective pour notre travail.

- L'intérêt de la destination. Il est déterminé en fonction de sa nature et de sa surface. La nature correspond aux types d'élément du paysage et donc aux espèces animales. Nous avons considéré pour toutes les espèces que plus la surface est grande, plus l'intérêt augmente et plus l'agent est persévérant pour atteindre la destination.
→ Les connaissances liées : concernant la nature de l'intérêt, les zones arborées seront préférées des renards par rapport au bâti. Pour les cervidés, le plus fort intérêt est dirigé vers les peuplements de feuillus puis vers les peuplements mixtes. Les conifères seront d'un intérêt faible, d'autant plus pour les chevreuils que pour les cerfs. L'intérêt de l'agent selon la superficie des éléments du paysage est une hypothèse.

- La vitesse moyenne. C'est la vitesse de déplacement que l'agent possède par défaut. Elle peut diminuer si l'agent rencontre des obstacles, puis augmenter à nouveau jusqu'à sa valeur moyenne lorsqu'il n'y a plus d'obstacles. Par simplification et parce que nous nous concentrons sur les déplacements, la vitesse moyenne est utilisée quelle que soit l'activité – repos ou recherche de ressources. Les phases d'activités sont donc seulement distinguées par les thèmes de destinations et par la sélection ou non d'une destination différente de l'endroit dans lequel se trouve l'agent.
→ Les connaissances liées : les vitesses moyennes ont été calculées à partir des trajectoires linéaires interpolées dans nos cas d'étude. Nous avons considéré les vitesses moyennes pendant une durée de 24 h, ce qui inclut les phases de repos et de déplacements rapides des individus suivis. Comme nous ne distinguons pas la vitesse en fonction des activités, cette moyenne pendant une journée permet de ne pas trop surestimer les espaces parcourus lors des simulations de trajectoires pendant cette même durée. La vitesse moyenne pour le renard est estimée à 2,2 km/h, pour le chevreuil à 0,35 km/h et pour le cerf à 0,45 km/h.

- La persévérance : elle est associée au temps que l'agent va consacrer pour atteindre sa destination choisie. Elle est liée à la personnalité de l'individu. Si un obstacle est sur sa trajectoire, l'individu va chercher à le contourner ou à le traverser à un endroit favorable, ceci pendant une certaine durée. Au-delà de ce délai, l'agent abandonne son objectif actuel et choisit une nouvelle destination. Nous avons traduit la persévérance par un facteur multiplicatif de la durée définie (par défaut 10 minutes) compris entre 0 et 2, qui diminue ou allonge cette durée.
→ Les connaissances liées : il s'agit d'hypothèses. La valeur peut être modifiée individuellement. Toutefois par espèce animale, nous avons considéré que les renards ont une persévérance en général plus élevée par rapport aux cervidés. Cela vient de leur caractère généraliste et de leur parcours d'occupations du sol potentiellement variées et pouvant contenir de nombreux obstacles au déplacement.

- L'audace : elle est également un aspect de la personnalité d'un animal. Un animal est audacieux s'il franchit des obstacles même lorsque ceux-ci sont dangereux. Nous traduisons ce paramètre par un facteur multiplicatif qui augmente ou diminue les probabilités de traversée des obstacles. Ce facteur est compris en 0 et 2 : s'il est inférieur à 1 alors la probabilité de traversée diminue, s'il est supérieur à 1 alors les probabilités peuvent augmenter jusqu'à 1. Par exemple pour une probabilité de traversée de 0,5 et une audace élevée à 1,8, la probabilité de traversée sera finalement de 0,5 x 1,8 égal à 0,9.
→ Les connaissances liées : l'audace reste individuelle et est définie par agent, de manière hypothétique. Cependant, nous considérons qu'elle diminue avec l'âge. Nous avons vu dans la littérature que les jeunes ont tendance à traverser plus facilement les routes, notamment pour

deux raisons : l'inexpérience face à un danger potentiel et le besoin de trouver un nouveau domaine vital.

- La mémoire : elle correspond à la mémorisation par l'agent des éléments du paysage parcourus ou non. On peut ainsi inciter ou décourager le fait de revenir sur un élément d'intérêt.
→ Les connaissances liées : il s'agit d'hypothèses. La mémoire est liée à l'émotion, par exemple la satisfaction pour un élément d'un grand intérêt, ou la peur pour un danger. Dans notre contexte de déplacements quotidiens, la mémoire est à court terme.

- L'espace parcouru : il s'agit de l'espace parcouru, qualifié de domaine vital si les observations couvrent une période de plusieurs jours (cf. chapitre III-1). Nous avons modélisé cet espace parcouru via l'emprise spatiale de l'environnement agent. L'environnement agent est restreint à une superficie qui peut être parcourue par un animal pendant la durée totale de simulation.
→ Les connaissances liées : l'étude des espaces parcourus pendant 24 h et l'estimation des domaines vitaux permettent de déterminer les surfaces parcourues pendant un ou plusieurs jours par les individus.

- Les comportements

Les comportements des agents concernent leurs déplacements. Des fonctions construisent les objets trajectoire correspondant aux déplacements. Les fonctions sont les suivantes.

- Le calcul de la perception par l'agent de son environnement spatial : les éléments de l'environnement spatial perçu par un agent sont sélectionnés à une certaine distance. La destination est choisie parmi ces éléments sélectionnés correspondant aux éléments d'intérêt.
→ Les connaissances liées : ce calcul correspond aux hypothèses sur la valeur du rayon de perception. Il est probable qu'un animal ne perçoive pas tous les éléments du paysage dans son voisinage de la même manière. Toutefois, nous définissons des distances pas trop grandes (50 m dans la plupart de nos tests de simulation) afin que la perception de l'agent reste cohérente avec la capacité de perception d'un animal.

- Le calcul d'une destination : c'est la fonction de sélection d'une destination que l'agent va chercher à atteindre. La destination oriente les directions suivies par l'agent lors de son déplacement.
→ Les connaissances liées : le calcul reprend les types d'éléments du paysage d'intérêt définis par espèce.

- Le calcul de la trajectoire : il est réalisé par l'agent point par point. L'agent adapte sa trajectoire en fonction des obstacles et des lieux favorables aux déplacements rencontrés. Un pas de temps est déterminé pour la construction des points. La distance parcourue dépend alors de la durée de ce pas de temps et de sa vitesse de déplacement.
→ Les connaissances liées : les déplacements des animaux sont connus par des localisations ponctuelles donc nous reprenons les points comme constituant la trajectoire. La distance parcourue dépend de la vitesse moyenne observée par espèce. Les obstacles rencontrés diminuent probablement la vitesse de déplacement, nous la prenons en compte dans l'implémentation même si cela reste hypothétique.

Les comportements des animaux dépendent normalement du type d'espace considéré. Nous avons travaillé sur les sites d'étude analysés dans le chapitre III, ce qui fait que les

comportements identifiés par espèce restent cohérents entre les observations et notre modélisation. Un enrichissement du modèle consisterait à adapter les propriétés et les comportements des agents aux types d'espaces.

2.2.2. La définition de l'environnement spatial et sa prise en compte par les agents

Les agents sont situés dans un environnement spatial. Nous avons choisi de considérer les thèmes suivants de la BD TOPO® : les zones arborées caractérisées selon les essences forestières principales {feuillus, conifères, mixtes} lorsque l'information est disponible, l'hydrographie (surface et cours d'eau), les routes et les chemins, les voies ferrées, les bâtiments, les pentes déduites du MNT. Ces thèmes ne couvrent pas l'espace de manière exhaustive mais nous avons pu les analyser précédemment en relation avec les observations sur les animaux. Nous n'avons pas utilisé par exemple les informations sur les cultures et les prairies du Registre Parcellaire Graphique car nous ne disposions pas des données numériques. Toutes les données utilisées dans l'environnement agent sont de grande précision spatiale, ce qui nous permet de prendre en compte l'espace à grande échelle et de considérer des projets d'aménagements précisément afin de définir des scénarios et de réaliser différents tests. Nous proposons deux modélisations de ces données.

- Une modélisation par grille : l'information géographique est agrégée à la résolution d'un pixel. Une cellule correspond à un type d'occupation du sol particulier, et non à plusieurs comme dans les matrices de coût qui additionnent plusieurs occupations du sol. La précision spatiale diminue avec ce procédé par rapport aux données initiales dont les géométries sont définies à partir des contours. Une grille séparée est dédiée aux valeurs de pentes.
- Une modélisation qui exploite le format initial des données : la description de l'espace est vectorielle pour les éléments décrits dans le RGE® et par grille pour les pentes.

Dans les deux types de modélisation, les informations attributaires sont prises en compte sur la nature des voies de communication qui donnent des informations sur leur largeur, leur revêtement et sur le trafic. Plus les voies sont larges et avec un trafic important, plus elles constituent un obstacle au déplacement.

Les agents construisent les trajectoires en fonction de leurs propriétés et de leurs comportements par rapport aux éléments du paysage. Les composantes de l'environnement spatial sont définies soit comme obstacles soit comme éléments favorables (ou corridors), et elles peuvent représenter des éléments d'intérêt ou des éléments évités. Cet environnement est simplifié et intègre des éléments du paysage d'emprise significative. Les éléments ont une influence sur les déplacements si ceux-ci se trouvent dans l'espace parcouru par un animal. Cet espace n'inclut par des éléments qui pourraient être neutres sur les déplacements des espèces. La fonction de déplacement de calcul de la trajectoire (*Calcul-trajectoire()* en Figure IV.13) doit prendre en compte les éléments potentiellement rencontrés par l'agent lors de ses déplacements. Le modèle de description de l'espace proposé est générique afin d'ajouter ou d'enlever des thèmes géographiques en fonction des espèces et en fonction des sites. Il est ainsi possible de modifier le rôle des éléments du paysage sur les déplacements des agents selon les tests. Cette modularité permet par la suite d'apporter des modifications dans les données numériques de description de l'espace. Concernant les propriétés de l'agent, nous n'avons pas développé l'influence de l'âge sur les déplacements, par simplification dans l'implémentation informatique du modèle. L'influence de l'âge concernerait notamment la connaissance par un animal de son espace de vie et son audace à traverser des obstacles. Les propriétés d'un agent (héritées ou non de l'animal qu'il représente) se traduisant dans la construction des trajectoires, sont les vitesses moyennes ainsi que le rythme des activités entre phases de repos et de

recherche de ressources. La modélisation proposée permet de modifier facilement les propriétés des agents d'une espèce en fonction des connaissances acquises. Il pourrait donc être possible de distinguer le comportement selon l'âge à partir du moment où cette connaissance est acquise. Dans la littérature, la distribution des vitesses calculées et celle des angles de changement de direction des déplacements observés sont couramment exploitées (Coulon *et al.*, 2008 ; Fortin *et al.*, 2005). Ces distributions constituent une source de connaissance probabiliste sur la forme des trajectoires en entrée des simulations de trajectoires : pour une localisation donnée d'un agent, la localisation suivante est déterminée selon une distance et un changement de direction probable, définis à partir de distributions observées. Nous avons développé la fonction de construction des trajectoires de manière à ce qu'elle puisse également intégrer des connaissances supplémentaires concernant la forme des trajectoires. Par mesure de simplification, nous nous concentrerons toutefois sur le calcul de trajectoires sans prendre en compte directement les valeurs de distances et de changements de directions observés dans nos cas d'étude.

Lors de la construction des trajectoires, nous considérons que l'animal perçoit les éléments du paysage si ceux-ci se situent sur son chemin. Cela signifie que l'agent ne prend pas en compte l'ensemble des éléments du paysage entre sa localisation actuelle et sa destination, mais qu'il adapte son chemin au fur et à mesure qu'il avance vers sa destination. Le pas de temps entre les localisations définit la distance que peut parcourir l'animal entre deux localisations simulées selon sa vitesse moyenne. Nous nous intéressons aux déplacements pendant des durées journalières et définis avec un pas de temps court (durée entre les localisations créées de l'ordre de la minute, nous y reviendrons en IV-2.3), ce qui fait que les distances entre les localisations restent relativement petites. La perception de l'agent lors de ses déplacements est donc considérée moins grande que son rayon de perception à l'intérieur duquel il sélectionne une destination. La perception de l'environnement spatial par l'agent lors de ses déplacements est considérée de deux manières, selon une perception globale et selon une perception locale. Nous appelons perception globale le fait que l'agent perçoive son environnement en synthétisant l'information selon un gradient d'intérêt et de difficulté de déplacement. Les éléments du paysage ne sont pas considérés séparément mais globalement pour une portion délimitée de l'espace. Nous désignons par perception locale le fait que l'agent perçoit chaque élément du paysage. Il va donc appréhender un obstacle selon ses contours. Nous illustrons ces deux perceptions en Figure IV.14. Un agent a sélectionné une destination à l'intérieur du rayon de sélection de la destination et il souhaite l'atteindre. Les localisations numérotées de 1 à 4 (a), et de 1 à 8 (b) représentent les résultats que nous voulons obtenir par notre modèle de simulation.

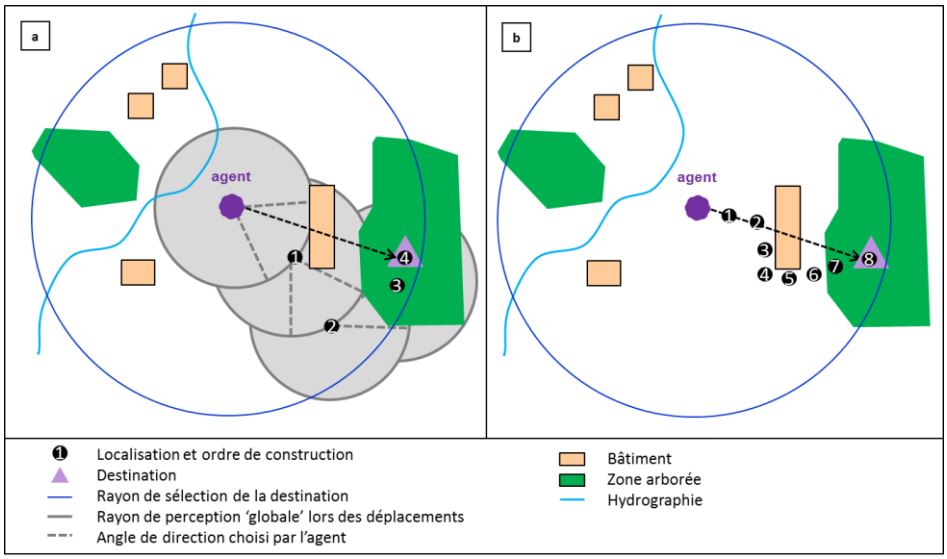


Figure IV.14. Les deux fonctions de construction de trajectoires correspondent à une perception différente de l'espace par les agents : a) perception globale avec la définition d'une direction moyenne, b) perception locale prenant en compte la géométrie des éléments du paysage.

Nous définissons deux fonctions de construction de trajectoires. L'implémentation de ces deux méthodes de déplacement est explicitée dans la partie IV-2.3 sur les algorithmes. Nous en présentons ici les principes.

- La fonction (a) de perception globale et dont le résultat est illustré en Figure IV.14.a :

L'agent perçoit les éléments du paysage à une distance de perception lors de ses déplacements (différent du rayon de perception de sélection d'une destination). Cette distance de perception correspond à la distance sur laquelle l'agent doit se déplacer théoriquement en fonction de sa vitesse moyenne et du pas de temps de simulation. À l'intérieur de cette distance, l'espace est lui-même perçu selon des parts de cercle, sur la Figure IV.14.a selon 5 parts de cercle. L'agent synthétise l'information dans chaque part de cercle selon les éléments favorables aux déplacements et les obstacles et selon la direction qui est privilégiée vers la destination. Une valeur de coût de déplacement est calculée et la part de cercle qui est la plus propice à des déplacements est conservée. Sur la figure, il s'agit de la part de cercle délimitée par des pointillés (d'un angle de 72 ° soit 360 ° divisé en 5 parts), qui définit ainsi la direction moyenne suivie par l'agent. La méthode est réitérée jusqu'à ce que l'agent se situe à proximité de sa destination. L'espace est considéré globalement, ce qui fait que certaines superpositions incohérentes sont possibles par cette méthode, par exemple un agent qui traverse un bâtiment. Cependant, cette méthode, relativement simple à mettre en œuvre, permet d'obtenir des trajectoires moyennes et de visualiser l'emplacement des zones propices au déplacement.

- La fonction (b) de perception locale, dont le résultat est illustré en Figure IV.14.b :

C'est une fonction de construction de trajectoires de proche en proche : l'appréhension des données géographiques par l'agent est précise, c'est-à-dire que l'agent se déplace en fonction de la géométrie des objets représentant les éléments du paysage. L'agent définit sa prochaine localisation par projetés de rayon à partir de sa localisation actuelle. L'agent « scanne » l'espace autour de lui en commençant par la direction vers laquelle il souhaite aller, c'est-à-dire vers la destination choisie, et selon une distance qui dépend de sa vitesse moyenne. S'il rencontre un obstacle à cette distance, alors il dévie sa trajectoire peu à peu selon de petits angles, jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'obstacle sur son chemin. Cette méthode se rapproche de l'algorithme A* (Kallmann, 2005). Cet algorithme permet de trouver un chemin entre un point initial et une destination en considérant la direction vers cette destination et en contournant les obstacles de

proche en proche. La fonction (b) permet donc de prendre en compte le contour des éléments du paysage mais peut être coûteuse en temps de calcul, notamment si l'agent se situe dans un espace très contraint avec beaucoup d'obstacles à gérer.

2.3. Les méthodes et les algorithmes développés

Pour que l'agent se déplace dans un environnement spatial, il doit avoir une stratégie définissant la chronologie de ses actions et il doit être associé à des méthodes représentant ses comportements. Nous présentons l'enchaînement des algorithmes développés correspondant aux comportements dans notre modèle agent (IV-2.3.1). Nous détaillons ensuite les algorithmes principaux (IV-2.3.2).

2.3.1. La stratégie d'un agent en correspondance avec l'enchaînement des méthodes

Notre intérêt porte sur les chemins empruntés par un animal dans un espace, et donc sur ses déplacements entre sa localisation actuelle et ses destinations. Nous nous sommes principalement concentrée sur l'aspect spatial des déplacements des animaux et sur comment les agents perçoivent et parcourent un espace. L'aspect temporel est moins développé. Le temps est cependant important dans notre modèle. Nous considérons les comportements de déplacement par un rythme journalier. Cela signifie que les animaux ont des phases de repos (déplacements limités aux éléments d'intérêt dédiés au repos) et des phases de recherche de ressources (déplacements plus intenses vers des éléments d'intérêt puis parcours de ces éléments représentant son exploitation pour l'alimentation ou pour une pause). Nous n'avons pas modifié les attributs de l'environnement spatial par souci de simplification. Cela reste une perspective car certains éléments du paysage peuvent avoir une influence différente selon la période de la journée. Par exemple, le trafic routier varie selon l'heure de la journée, ainsi que la fréquentation de certains sites par des personnes comme les parkings des centres commerciaux ou les zones industrielles. Cet aspect peut être partiellement inclus par les rythmes d'activités des animaux : il est possible de définir une alternance des activités entre repos et déplacements en fonction de l'heure de la journée comme en Tableau IV.1, qui peut correspondre indirectement aux rythmes d'activités humaines.

L'enchaînement des étapes du module de construction de trajectoires par un agent

Pour simuler les déplacements, nous développons un module informatique (présenté en 2.4) permettant de créer et d'attribuer des comportements à des agents. Le Tableau IV.2 décrit l'enchaînement des méthodes (fonctions) développées pour qu'un agent construise ses trajectoires selon ses comportements et dans un espace. Nous considérons dans ce schéma le choix entre plusieurs méthodes possibles correspondant à une implémentation différente (par exemple, choix entre la fonction de déplacement par perception globale ou par perception locale). Nous avons indiqué en orange les valeurs et les fonctions associées aux étapes du processus agent qui sont paramétrables. La construction des trajectoires est en partie aléatoire, pour les aspects indiqués en vert (concernant la sélection des destinations). Les connaissances sur les espèces indiquées en violet sont intégrées dans le module par des valeurs moyennes fixées par défaut mais qui restent modifiables (type d'élément d'intérêt, vitesse moyenne de déplacement). Les fonctions sont lancées dans l'ordre chronologique présenté.

Tableau IV.2. Les étapes du module de simulation de trajectoires : les méthodes associées à paramétrer ont été développées pour qu'un agent puisse construire des trajectoires.

Police en orange : ce qui est paramétrable, **en vert :** ce qui est aléatoire, **en violet :** connaissances utilisées

Étapes	Sous-étapes	Fonctions et paramètres	Résultats
Création d'un agent et paramétrage	Création d'un environnement spatial agent = une carte	-Chargement dans l'interface graphique : choix des **données géographiques** à afficher et prises en compte lors du processus de simulation	Agent et environnement créés
	Création d'un agent		
	Définition des paramètres de simulation	-Paramétrage par l'interface graphique : choix d'une **espèce**, d'un **pas de temps** de construction des localisations de la trajectoires.	Paramètres définis
Choix d'un mode de déplacement	Choix de la motivation au déplacement entre : -Exploratoire -Ou vers une destination définie	-Définition d'un **rythme d'activité** pendant 24 heures entre « repos » et « recherche de ressources » **Rythme défini par espèce à partir de la littérature et des analyses de données (chapitre III)**	Rythmes de déplacement définis
		-Si « vers une destination définie » : sélection à partir de l'interface graphique d'un point de **destination**	
Sélection d'une destination	Détermination des thèmes géographiques pour les destinations	Méthode : sélection des **thèmes de destination** selon l'activité du moment. **Définis à partir de la littérature et des analyses de données (chapitres II et III)**	Liste des thèmes de destinations potentielles
	Sélection de zones d'intérêt potentielles	Méthode : sélection dans un **rayon de perception**	Objets de destination potentielles
	Calcul d'un indice d'intérêt entre le point et chaque destination présélectionnée.	Méthode de sélection d'un **objet de destination** : par ex. indice par moyenne pondérée en fonction de la distance et des éléments du paysage potentiellement rencontrés. Paramètres : -Facteurs pris en compte : Distance agent-objet Intérêt (superficie de l'objet) Nombre de routes à traverser en ligne droite Nombre de bâtiments à traverser en ligne droite Nombre de cours d'eau à traverser en ligne droite Nature de la végétation à traverser (pour les cervidés) - Seuils par facteur pour la définition d'une valeur normée à inclure dans le calcul de la moyenne pondérée -Valeurs des pondérations des facteurs dans la moyenne **Déduit des connaissances sur les éléments pouvant faire obstacle lors des déplacements et sur les lieux d'intérêt motivant les déplacements des renards, chevreuils et cerfs (chapitres II et III)**	Liste des objets dans le rayon de perception dont l'indice est inférieur à un seuil
	Sélection d'un objet destination	Méthode : **sélection aléatoire**, parmi les objets de destination présélectionnés dont la valeur de l'indice est inférieure à une **valeur seuil**	Destination sélectionnée
	Sélection d'un point de destination	Méthode : **sélection aléatoire**, parmi les points du contour	Point sur le contour de l'objet de destination sélectionnée
	Choix de la fonction de construction de trajectoire	-Méthode : sélection entre les **fonctions de construction de trajectoire** développées : - « fonction de coût » (a) - « projetés de rayon » (b)	Algorithme de déplacement
Aller vers une destination	Créer des points de la trajectoire	Sélection des paramètres dans l'algorithme de déplacement: -Définition des **obstacles** hermétiques ou traversables selon une probabilité -Probabilités de traverser les obstacles selon leur nature. -Durée maximale de confrontation à un obstacle avant une modification de la destination. **Défini à partir des connaissances sur les préférences spatiales sur les espèces (chapitres II et III).**	Liste de points de la trajectoire (x, y, z, t) avec le temps incrémenté au fur et à mesure de la construction de la trajectoire
	Adapter la vitesse de déplacement	Valeur de la **vitesse de déplacement** et donc de la **distance parcourue** soit : 1) Adaptation de la vitesse de déplacement à l'aide d'une valeur d'accélération : -En fonction du nombre d'obstacles rencontrés précédemment : la vitesse pour le point d'après est diminuée. -Si la trajectoire est bloquée (par exemple forme de bâtiments complexes et distance aux points précédents trop petite : création d'un point à distance très petite) 2) Vitesse selon une distribution observée **Distribution des distances à partir des vitesses des déplacements observés (chapitre III).**	Liste des distances et des vitesses de la trajectoire créée

Quatre étapes principales ont été définies pour qu'un agent construise une trajectoire selon des comportements définis (Tableau IV.2) :

- Étape 1 : Création d'un agent et paramétrage

La première étape crée l'environnement agent et un agent animal correspondant à une espèce. L'environnement agent est spatial et il est constitué par les données géographiques. Les paramètres de simulation sont définis grâce à une interface graphique : espèce animale correspondant à l'agent, pas de temps c'est-à-dire l'intervalle de temps entre deux localisations successives d'une trajectoire.

- Étape 2 : Choix du mode de déplacement

Le choix du mode de déplacement concerne la motivation et distingue :

- les déplacements exploratoires : aucun lieu de destination précis n'est à atteindre au final, la simulation s'arrête avec une durée fixée dans le système (équivalent à 24 h par exemple). L'agent peut donc sélectionner plusieurs destinations, les atteindre et les exploiter ;
- les déplacements vers une destination fixe définie : un lieu de destination est noté comme à atteindre via l'interface graphique. La construction de la trajectoire est la même que pour les déplacements exploratoires à la différence près que la sélection des destinations s'effectue non pas dans l'ensemble du cercle correspondant au rayon de perception mais dans une portion de ce cercle. La portion de cercle est orientée de l'agent vers la destination et a par défaut un angle de 270°. L'agent arrête la construction de sa trajectoire lorsqu'il arrive à la destination fixée.

Cette étape inclut également le paramétrage selon les plages horaires des rythmes d'activités, définies ou non par défaut par espèce comme vu précédemment (Tableau IV.1).

- Étape 3 : Sélection d'une destination

L'étape de sélection d'une destination concerne la décision d'un agent de choisir une destination à l'intérieur de son rayon de perception. Pour sélectionner cette destination plusieurs paramètres sont définis :

- les thèmes des éléments du paysage d'intérêt pour l'agent ;
- la valeur du rayon de perception ;
- le type de méthode de sélection d'une destination, qui peut attribuer plus ou moins d'importance aux obstacles situés entre l'agent et la destination, ou à l'importance de la destination.

Parmi une présélection des éléments du paysage de destination, l'agent en choisit aléatoirement une, puis choisit aléatoirement un point de son contour. Une fois le point de contour atteint, on considère que l'agent est arrivé à destination et qu'il peut l'exploiter en la parcourant et en restant à proximité.

- Étape 4 : Aller vers une destination

La dernière étape est celle de la construction de la trajectoire point par point. Deux fonctions sont proposées :

(a) la « fonction de coût » correspond à la perception globale de l'espace ;

(b) la fonction par « projetés de rayon » correspond à la perception locale de l'espace. Nous avons également testé une méthode qui consiste pour l'agent à longer le contour des obstacles jusqu'à ce qu'il tente une traversée ou qu'il renonce à sa destination. Cette méthode nous a semblé donner des comportements moins réalistes.

Les paramètres des fonctions de construction de trajectoires concernent les éléments du paysage qui ont un rôle d'obstacle, les probabilités de traversée des obstacles et le seuil de temps d'atteinte de la destination avant que l'agent ne change de destination. La caractérisation des éléments du paysage selon leur rôle peut être modifiée à partir du paramétrage par défaut

issu des connaissances modélisées : il est alors possible de tester d'autres définitions de l'espace (par exemple les routes comme lieux d'intérêt et non comme obstacles).
Les fonctions de construction de trajectoires permettent de définir la direction vers laquelle se dirige l'agent. La distance séparant les deux localisations est ensuite ajustée en fonction de la vitesse de déplacement :
1) soit en fonction des obstacles qui ralentissent la vitesse ;
2) soit selon une distribution de vitesses issue d'observations.

Ces étapes correspondent au déplacement de l'agent : une fois que l'agent a atteint sa destination, il l'exploite pendant une certaine durée. Le processus de déplacement est ensuite réitéré avec une autre destination jusqu'à ce qu'il atteigne son lieu final de destination ou que la durée de simulation (24 h dans la plupart de nos tests) soit écoulée.

Un agent à deux états

Nous définissons deux états pour un agent animal : un état (1) dans lequel l'agent a sélectionné une destination, et un état (2) dans lequel la destination est atteinte, voir la Figure IV.15.

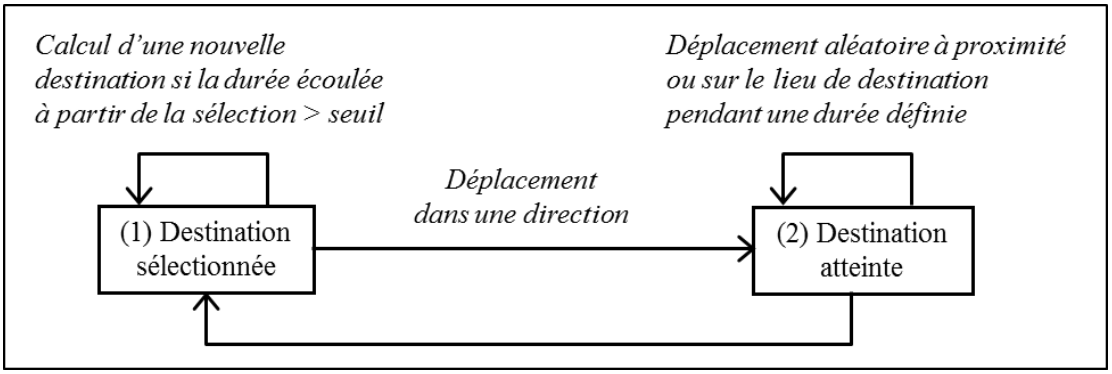


Figure IV.15. Les deux états des agents : (1) destination sélectionnée à atteindre et (2) destination atteinte puis exploitée.

Lorsqu'une destination (point ou élément du paysage correspondant à un élément d'intérêt) est sélectionnée (état 1), l'agent se déplace pour l'atteindre pendant une certaine durée. Au-delà d'un certain seuil, l'agent renonce et sélectionne une nouvelle destination. Par défaut le seuil avant que l'agent se décourage est de 60 minutes. Si l'agent atteint cette destination dans la durée impartie (état 2), l'agent peut l'exploiter. L'agent la parcourt s'il s'agit d'un élément du paysage de type zone arborée (intérêt pour les renards, chevreuils et cerfs), et reste à proximité dans le cas des bâtiments (intérêt pour les renards). Au bout d'un laps de temps, on considère que l'agent a fini d'exploiter l'élément du paysage et revient à l'état (1) avec une destination à sélectionner et à atteindre. La durée d'exploitation est par défaut de 10 minutes pour toutes les espèces, ce qui peut être court par rapport à la réalité notamment pour les cervidés, mais ce qui permet de représenter des déplacements rapides et de se concentrer sur les chemins empruntés entre 2 destinations. Cette durée reste modifiable et paramétrable selon l'espèce animale. L'algorithme proposé correspondant à ces deux états est présent ci-dessous en pseudo-code.

```
strategieEtatAgent(localisationInitiale, seuilDureeAtteindreDestination,
seuilDureeExploitationDestination)
Initialisation sélection d'une destination à partir de
localisationInitiale
                dureeAtteindreDestination = 0
                dureeExploitationDestination = 0 ;
   Si dureeAtteindreDestination < seuilDureeAtteindreDestination Faire :
      L'agent se déplace vers la destination sélectionnée en construisant
sa trajectoire point par point.
      Si l'agent atteint la destination Faire :
      Tant que dureeExploitationDestination <
seuilDureeExploitationDestination Faire :
         L'agent exploite la destination
      Incrémentation de dureeExploitationDestination
      Fin Si
      Incrémentation de dureeAtteindreDestination
   Sinon Faire :
      L'agent sélectionne une nouvelle destination
   Fin Si
```

L'agent garde en mémoire les destinations qu'il a atteintes et exploitées dans l'état (2). Nous avons paramétré la possibilité ou non pour l'agent dans l'état (1) de choisir sa prochaine destination parmi ces précédentes destinations. Si l'agent ne peut pas sélectionner la même destination, cela indique que celle-ci a été exploitée et qu'il n'y retourne pas pendant la durée de simulation (par exemple une journée). C'est le cas des renards en milieu périurbain lorsqu'ils se déplacent en dehors de leur lieu de gîte de repos. Ils sont plutôt enclins à explorer plusieurs endroits, même éloignés de plusieurs centaines de mètres. Pour les chevreuils en milieu forestier, les cas d'étude nous ont permis de voir qu'ils se déplacent dans des zones restreintes d'intérêt (points en amas dans 3 zones d'intérêt en Figure IV.16) puis qu'ils effectuent des déplacements un peu plus longs afin de joindre ces différentes zones (points éloignés en Figure IV.16).

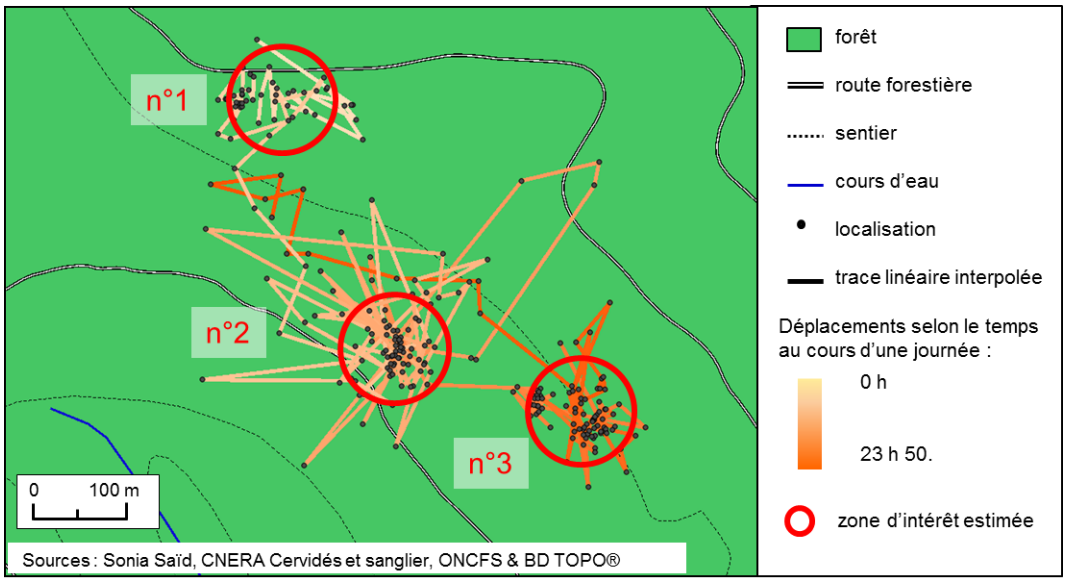


Figure IV.16. Les localisations d'un chevreuil enregistrées pendant 24 heures et la trace en fonction de l'heure de la journée. Les localisations proches dans le temps ont tendance à être regroupées dans des endroits proches, ce qui montre l'exploitation d'un même lieu.

Le comportement d'exploitation des zones d'intérêt en Figure IV.16 est plus ou moins intense. Le chevreuil exploite assez rapidement les zones d'intérêt n° 1 et n° 3. Il exploite par contre plus longtemps la zone d'intérêt n° 2, avec quelques incursions un peu éloignées du lieu exploité le plus intensément. À la fin de la journée de suivi, il effectue un déplacement rapide en traversant sans s'arrêter la zone n° 2. Note modèle ne prend pas en compte aussi précisément la distinction entre différents types d'exploitation. Cependant, nous avons traduit dans le paramétrage que les chevreuils, ainsi que les cerfs, ont tendance à rester longtemps au même endroit. Les agents de ces deux espèces animales ont la possibilité de sélectionner comme destination un même élément du paysage plusieurs fois afin de l'exploiter comme zone d'intérêt (repos, prise de nourriture, exploration) ou le traverser.

2.3.2. Les algorithmes de construction de trajectoires par un agent

Nous nous focalisons dans cette partie sur deux méthodes importantes du processus de simulation : la sélection d'une destination et le déplacement d'un agent dans son environnement. La construction des trajectoires par un agent est non déterministe. Cela signifie qu'un même agent avec un même comportement et associé aux mêmes valeurs de paramètres de simulation, peut effectuer des trajectoires différentes à partir d'un point initial identique. La propriété non-déterministe de la construction des trajectoires nous permet de traduire la part d'aléatoire dans les déplacements des animaux, due à des décisions individuelles et à des évènements dans l'environnement non modélisés. Nous avons développé cet aspect dans l'implémentation lors de la sélection des destinations et lors des déplacements de l'agent prenant en compte les éléments du paysage.

La sélection d'une destination dans un rayon de perception

L'agent sélectionne des destinations potentielles à l'intérieur de son rayon de perception (paramétré à 50 m en Figure IV.17) et parmi les thèmes définis comme éléments d'intérêt pour son espèce et en adéquation avec son activité du moment (repos ou recherche de ressources).

Figure IV.17. Un agent et les objets de destination potentielle de type zone arborée dans son rayon de perception.

Dans la liste de destinations potentielles, l'agent sélectionne un unique objet de destination. Nous appelons objet un élément du paysage représenté par un objet de la base de données de description de l'espace. Pour chaque objet de destination potentielle, une caractérisation de cet objet et de l'espace entre l'agent et cet objet est effectuée afin que l'agent puisse ensuite choisir une destination intéressante. La Figure IV.17 montre le cas d'un agent de l'espèce « renard » lors d'une phase de repos. Il a sélectionné dans son rayon de perception de 50 m les objets de destination potentielle correspondant aux objets de zone arborée, soit 3 objets. Ces 3 objets ont des superficies différentes et sont séparées de l'agent par d'autres éléments du paysage influençant le choix d'une seule destination.
Les destinations potentielles dans notre modèle ne peuvent être que les zones arborées et pour le renard en phase de recherche de ressources, également les bâtiments. Nous avons défini une méthode de sélection d'une seule destination par l'agent prenant en compte plusieurs critères :

- la distance de la destination potentielle à l'agent : plus la destination est éloignée, moins elle est intéressante pour l'agent car il y a davantage à parcourir, et davantage de dangers et d'obstacles peuvent être rencontrés. La distance calculée est celle entre l'agent et le point de contour de la destination le plus proche ;
- l'importance de la destination : nous avons considéré que plus la destination a une grande superficie, plus elle est intéressante car elle représente un potentiel de ressources plus important. Sur la Figure IV.17, parmi les 3 destinations de zone arborée, la plus grande est celle numérotée 3, avec 0,3 km². Nous avons défini les seuils à partir de l'étude des distributions en surfaces des zones arborées en milieu périurbain à Nancy, afin d'obtenir des seuils cohérents. Une perspective du travail est de modifier ces seuils en fonction des espèces animales et également en fonction des sites d'étude et de leur composition en couvert arboré. Pour les cervidés en milieu forestier où les surfaces arborées sont grandes, on note que l'importance de la destination varie peu en fonction de la surface. Par contre, dans les sites où l'information est disponible, nous avons ajouté le critère du type de peuplement forestier principal (feuillus, conifères, mixtes). Si la destination est composée majoritairement de feuillus ou de peuplements mixtes, elle est plus intéressante que si elle est composée de conifères. Nous avons défini les indices de préférence directement dans l'intervalle de valeurs normalisées entre 1 et 5 (cf. paragraphe suivant), qui est un petit intervalle, afin de traduire ces préférences de peuplement de manière assez générale, sans reprendre exactement les pourcentages de localisations situées dans les peuplements respectifs ;
- le nombre de routes : les routes sont comptées entre l'agent et la destination par intersection de la ligne droite du plus court chemin. Plus il y a de routes à traverser, plus la destination est considérée difficile à atteindre et moins la destination est intéressante. Nous n'avons pas distingué les types de voies de communication car il s'agit d'une estimation de la situation actuelle de l'agent par rapport à ses destinations potentielles et non d'une caractérisation fine de ses trajectoires possibles pour les atteindre. Les seuils ont été définis selon l'étude des sites de Nancy et des Vosges, à partir de l'ordre de distance parcourue par les agents pendant le pas de temps de simulation (pour 1 minute, environ 37 m pour le renard, 6 m pour le chevreuil et 8 m pour le cerf). Nous n'avons pas pris ici en compte les voies ferrées mais ce serait une perspective d'enrichissement ;
- le nombre de bâtiments : le principe est le même que pour les routes, sauf qu'il s'agit d'objets surfaciques moins susceptibles d'être intersectés que les routes d'emprise linéaire ;
- le nombre de cours d'eau : le principe est le même que pour les routes. Les informations sur la largeur et la profondeur des cours d'eau ne sont pas présentes dans la BD TOPO®, nous ne les avons donc pas considérées.

Nous avons sélectionné uniquement les routes, les bâtiments et les cours d'eau comme obstacles influençant le choix de la destination par l'agent car ce sont les éléments dans les bases de données les plus présents sur les sites étudiés. Nous avons défini un indice de sélection qui effectue une somme pondérée des critères selon leur importance. La formule de cet indice est présentée dans l'algorithme suivant. Les critères pris en compte sont normalisés par des valeurs comprises entre 1 et 5, afin de pouvoir les utiliser dans une même formule malgré leurs unités diverses (décompte, longueur, surface). Cet indice est calculé par destination potentielle.

```
calculIndice (destination_potentielle)
Initialisation
      dist = distance entre l'agent et la destination en mètre
      Si (dist <= 20){ distDest = 5; }
              Sinon ((dist > 20) && (dist <= 50)){ distDest = 4; }
              Sinon ((dist > 50) && (dist <= 100)){ distDest = 3; }
              Sinon ((dist > 100) && (dist <= 200)){ distDest = 2; }
              Sinon (dist > 200){ distDest = 1; }
      distance_agent_destination = distDest

      surf = superficie de la destination en m²
              Si(surf >= 1000){ impDest = 5; }
              Sinon ((surf < 1000) && (surf >= 700)){ impDest = 4; }
              Sinon ((surf < 700) && (surf >= 400)){ impDest = 3; }
              Sinon ((surf < 400) && (surf >= 100)){ impDest = 2; }
              Sinon (surf < 100){ impDest = 1; }
      taille_destination = impDest

      nR = nombre de routes entre l'agent et la destination
              Si(nR <= 2){ nRDest = 5;}
              Sinon ((nR > 2) && (nR <= 4)){ nRDest = 4;}
              Sinon ((nR > 4) && (nR <= 6)){ nRDest = 3;}
              Sinon ((nR > 6) && (nR <= 8)){ nRDest = 2;}
              Sinon (nR > 8){ nRDest = 1;}
      nombre_routes = nRDest

      nBat = nombre de bâtiments entre l'agent et la destination
              Si(nBat <= 2){ nBatDest = 5;}
              Sinon ((nBat > 2) && (nBat <= 4)){ nBatDest = 4;}
              Sinon ((nBat > 4) && (nBat <= 6)){ nBatDest = 3;}
              Sinon ((nBat > 6) && (nBat <= 8)){ nBatDest= 2;}
              Sinon (nBat > 8){ nBatDest = 1;}
      nombre_bâtiments = nBatDest

      nCE = nombre de cours d'eau entre l'agent et la destination
              Si(nCE <= 0){ nCEDest = 5;}
              Sinon ((nCE > 0) && (nCE <= 1)){ nCEDest = 4;}
              Sinon ((nCE > 1) && (nCE <= 2)){ nCEDest = 3;}
              Sinon ((nCE > 2) && (nCE <= 3)){ nCEDest= 2;}
              Sinon (nCE > 3){ nCEDest = 4;}
      nombre_cours_eau = nCEDest

      Si(espèce_agent est chevreuil) Faire :
          Si(type_peuplement_destination est feuillu) Faire :
            type_foret_destination = 5
          Si(type_peuplement_destination est mixte) Faire :
            type_foret_destination = 4
          Si(type_peuplement_destination est conifère) Faire :
            type_foret_destination = 1
      Fin si
      Si(espèce_agent est cerf) Faire :
```

```
          Si(type_peuplement_destination est feuillu) Faire :
            type_foret_destination = 5
          Si(type_peuplement_destination est mixte) Faire :
            type_foret_destination = 4
          Si(type_peuplement_destination est conifère) Faire :
            type_foret_destination = 3
      Fin si

  indice_pondéré = (distance_agent_destination * 5)
            + (taille_destination * 4)
            + (nombre_routes * 3)
            + (nombre_batiments * 3)
            + (nombre_cours_eau * 1)
            + (type_foret_destination * 5)
```

L'influence des critères pris en compte dans la valeur de l'indice final est illustrée en Figure IV.18 : (a) pour le critère du nombre de routes et de cours d'eau entre l'agent et la destination et (b) pour le critère de distance. La contribution des critères dans l'indice s'effectue donc par paliers.

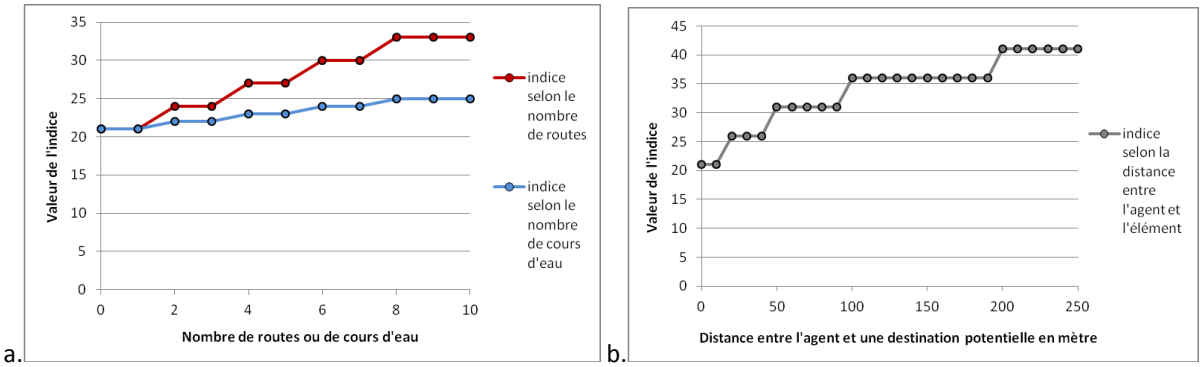


Figure IV.18. Effet des facteurs pris en compte pour le calcul de l'indice de sélection des destinations par l'agent : a) effet du nombre de routes et des cours d'eau, b) effet de la distance agent-élément. La valeur de l'indice varie par paliers.

Dans le calcul de l'indice, les valeurs normalisées par critères (entre 1 et 5) sont pondérées chacune par une certaine valeur fixée par défaut mais qui reste paramétrable. Plus la pondération est grande, plus la contribution des critères est importante dans l'indice. Le critère le plus influent dans le choix de la destination avec une pondération de 5 est la distance entre l'agent et les destinations potentielles, car nous faisons l'hypothèse que la distance à parcourir est le facteur le plus limitant lors du choix des destinations. L'importance de l'élément est ensuite le critère pris le plus en considération : le type de peuplement forestier de pondération 5 pour les cervidés qui influence très significativement les déplacements d'après nos analyses statistiques, puis la superficie de la destination de pondération 4 qui repose sur l'hypothèse d'un intérêt dépendant de ce facteur. Par exemple, les renards peuvent utiliser les bois lors de leur repos diurne et les cervidés vivent dans de grandes surfaces arborées en milieu forestier. Les obstacles (routes, bâtiments, cours d'eau) sont pris en compte par une pondération de 3 pour les routes et les bâtiments, et de 1 pour les cours d'eau. Ces choix de pondérations s'appuient sur nos analyses de données (chapitre III) qui ont montré que les traversées de routes restent faibles dans tous les cas d'étude. Les bâtiments constituent un obstacle représentant un dérangement humain, et un obstacle physique même s'ils peuvent être contournés. Nous n'avons pas de résultats sur les cours d'eau donc nous choisissons une pondération faible. Les valeurs de l'indice sont comprises entre 16 et 80 dans le cas des renards, et entre 21 et 105 dans

le cas des cervidés. Plus la valeur de l'indice est élevée, plus la destination potentielle est considérée comme intéressante et facile à atteindre. Une fois que cet indice est calculé pour chaque destination potentielle, seules les destinations dont les valeurs sont supérieures à un certain seuil sont conservées. L'agent choisit ensuite aléatoirement parmi cette dernière sélection, comme indiqué par l'algorithme suivant.

```
selectionDestination (liste_destinations_potentielles, seuilMin,
redondance_destination, liste_destinations_déjà_choisies)
Initialisation liste_destinations_conservees
               destination_choisie
  Pour (chaque destination potentielle) Faire :
    indice = calculIndice (destination_potentielle)
    Si (indice > seuilMin) Faire :
      Ajouter destination_potentielle dans liste_destinations_conservees
    Fin Si
  Fin Pour
  Si (liste_destinations_conservees n'est pas nulle) Faire :
    Si (redondance_destination est possible) Faire :
      Choisir aléatoirement une destination ∈
liste_destinations_conservees
    Sinon Faire :
      Choisir aléatoirement une destination ∈
liste_destinations_conservees et ∉ à liste_destinations_déjà_choisies
    Fin si
  Sinon Faire :
    Si (redondance_destination est possible) Faire :
      Choisir dans liste_destinations_potentielles la destination
potentielle avec l'indice le plus élevé
    Sinon Faire :
      Choisir dans liste_destinations_potentielles la destination
potentielle avec l'indice le plus élevé et ∉ à
liste_destinations_déjà_choisies
    Fin si
  Fin Si
  Ajouter destination_choisie dans liste_destinations_déjà_choisies
```

La valeur seuil minimale de sélection des destinations potentielles est paramétrable dans le système. Nous l'avons fixée par défaut à 50, soit environ à la moitié des valeurs maximales de l'indice d'intérêt des destinations potentielles. Ce seuil permet de conserver dans la plupart des cas plusieurs destinations potentielles, et donc un choix aléatoire d'une destination différente entre les lancements de simulation de paramétrage identique, et de traduire les causes aux déplacements non connues et celles non modélisées. Si aucune destination n'est associée à un indice supérieur à la valeur seuil minimale, la destination potentielle avec l'indice le plus élevé est choisie par l'agent. Le paramètre de sélection multiple d'une même destination (redondance_destination) est fixé par défaut à vrai pour le chevreuil et le cerf et à faux pour le renard qui effectue des déplacements moins restreints, comme indiqué plus haut dans la partie « Un agent à deux états » en IV-2.3.1. Une fois un objet de destination sélectionné, dans notre cas une zone arborée ou un bâtiment, un point de son contour est choisi aléatoirement. L'agent prend la direction de ce point de contour pour atteindre sa destination.

Les algorithmes de déplacement

Comme mentionné en VI-2.2, nous avons développé deux méthodes de simulation de la perception de l'espace lors des déplacements des agents. Cette perception ne concerne pas la sélection des destinations dans un rayon de perception et donc les choix de directions générales.

Elle concerne la perception des éléments du paysage lors des choix de directions locales. Dans l'état (1), il s'agit pour l'agent de savoir s'il peut continuer dans la direction de sa destination ou s'il doit dévier sa trajectoire pour éviter un obstacle ou emprunter un élément de paysage favorable. L'objet trajectoire, construit par l'agent, est constitué de localisations déterminées successivement. La méthode de construction accepte comme paramètre la localisation initiale de l'agent, la destination à atteindre, le pas de temps de simulation (durée entre deux localisations, par exemple 1 minute) et la durée maximale avant que l'agent ne renonce à atteindre la destination (seuil_durée_déplacement). La persévérance est un facteur multiplicatif de la durée maximale, compris entre 0 et 2, qui réduit ou augmente cette durée. La persévérance est un paramètre attribué aux agents individuellement, même si a priori elle est plus élevée chez le renard que chez les cervidés. Nous l'avons fixée par défaut à 1 car nous avions peu d'individus dans nos cas d'étude pour modifier et tester cette valeur. Dans la méthode, nous avons fixé à 5 m le paramètre correspondant à la distance maximale à partir de laquelle nous considérons que l'agent a atteint sa destination. L'algorithme suivant concerne le calcul d'une trajectoire vers une destination sélectionnée. Si l'agent est en mode de déplacement exploratoire, une fois la destination atteinte ou la durée maximale dépassée, une nouvelle destination est sélectionnée. Dans le cas où l'agent est en mode de déplacement vers une destination définie, alors la construction de la trajectoire s'arrête.

```
calculTrajectoire (localisationInitiale, destination, pas_temps,
seuil_durée_déplacement, persévérance, méthode_déplacement)
Initialisation   trajectoire
                 n = 1
                 localisations_n
                 localisations_n-1 = localisationInitiale
                 durée_déplacement = seuil_durée_déplacement * persévérance
  Si méthode_déplacement = fonction_de_coût Faire :
    localisation_n = fonction_de_coût(localisation_n-1, destination,
pas_temps, durée_déplacement)
  Fin si
  Si méthode_déplacement = projetés_de_rayon Faire :
    localisation_n = projetés_de_rayon(localisation_n-1, destination,
pas_temps, durée_déplacement)
  Fin si
  Ajouter à trajectoire : localisation_n
  localisation_n-1 = localisation_n
  n = n + 1
```

Nous présentons ci-dessous les algorithmes de déplacements selon les deux méthodes proposées.

- La fonction (a) de perception globale : la « fonction de coût »

Pour le principe de la fonction de coût au déplacement, l'agent prend en compte son voisinage spatial selon les éléments du paysage ayant un rôle d'obstacle et ceux ayant un rôle favorable au déplacement. Le voisinage spatial est considéré autour de la localisation actuelle de l'agent. Le rayon de voisinage correspond à la distance de perception lors de ses déplacements. Nous avons pris pour cela la distance parcourue théoriquement à partir de la vitesse moyenne de l'agent et du pas de temps entre deux localisations successives. Par exemple, pour un agent de l'espèce renard se déplaçant à une vitesse moyenne de 2,2 km/h et pendant un pas de temps de 1 minute, le rayon de voisinage sera de 37 m. Dans ce rayon, l'espace de voisinage est séparé en plusieurs parts correspondant à des arcs de cercle égaux. En Figure IV.19, le voisinage est considéré vers la destination avec un angle total de 180° et il est séparé en 5 parts de 36°. Sur

chacune de ces parts, un indice d'intérêt du choix de la direction, pouvant s'apparenter à un coût de déplacement inversé, est calculé en prenant en compte les éléments du paysage présents dans les parts. L'indice de plus grande valeur correspond à l'aspect favorable au déplacement et donc à la part de cercle qui est la plus intéressante à suivre pour l'agent. Les éléments pris en compte et la manière dont ils sont pris en compte (dénombrement ou superficie) correspondent aux critères listés ci-dessous. Chaque critère de la liste est discrétisé en 4 modalités ordonnées entre un intérêt faible (0) de prendre ce chemin à important (3). Nous en indiquons les valeurs de seuil.

- Pour les obstacles :

- le nombre de routes ;
  Égal à 0 ou 1 (inclus) → critère = 3
  Entre 2 et 5 → critère = 2
  Entre 6 et 10 → critère = 1
  Supérieur ou égal à 11 → critère = 0
- le nombre voies ferrées ;
  Égal à 0 ou 1 → critère = 3
  Égal à 2 → critère = 2
  Égal à 3 → critère = 1
  Supérieur ou égal à 4 → critère = 0
- le nombre bâtiments ;
  Égal à 0 ou 5 → critère = 3
  Entre 6 et 20 → critère = 2
  Entre 21 et 25 → critère = 1
  Supérieur ou égal à 26 → critère = 0
- le nombre cours d'eau ;
  Égal à 0 ou 3 → critère = 3
  Entre 4 et 10 → critère = 2
  Entre 11 et 30 → critère = 1
  Supérieur ou égal à 31 → critère = 0
- la superficie des plans d'eau ;
  Égal à 0 ou 5000 m² → critère = 3
  Entre 5001 m² et 50000 m² → critère = 2
  Entre 50001 m² et 100000 m² → critère = 1
  Supérieur ou égal à 100001 m² → critère = 0
- la somme des pentes correspondant aux cellules du MNT croisées par la part de cercle.
  Égal à 0° ou 300° → critère = 3
  Entre 301° et 600° → critère = 2
  Entre 601° et 900° → critère = 1
  Supérieur ou égal à 901° → critère = 0

Pour les éléments du paysage qui sont estimés comme faisant obstacle, plus le nombre est important dans la part de cercle ou plus la superficie correspondante est grande, alors plus la valeur de coût au déplacement sera élevée et la valeur d'intérêt sera faible. La plupart des valeurs de seuil sont plus grandes que dans la fonction de sélection des destinations car le nombre d'intervalle est moins grand (4 et non 5), même si la distance considérée est plus petite.

- En parallèle, une valeur indiquant l'aspect favorable au déplacement est calculée. Seule la végétation est le critère pris en compte. Plus la superficie des zones arborées est grande dans la part de cercle, plus la direction correspondante à cette part sera intéressante pour le déplacement.
  Égal à 0 ou 5000 m² → critère = 0
  Entre 5001 m² et 50000 m² → critère = 1

```
Entre 50001 m² et 150000 m² → critère = 2
Supérieur ou égal à 150001 m² → critère = 3
```

- Enfin la direction de la part de cercle par rapport à la destination est prise en compte, en considérant que la direction la mieux orientée vers la destination est la plus favorisée par l'agent. Pour un angle total de 180° et 5 parts de cercle, le critère est alors associé aux valeurs suivantes :

```
Les 2 parts de cercle extérieures → critère = 1
Les 2 parts de cercle du milieu → critère = 2
La part de cercle centrale → critère = 3
```

Les valeurs de seuils des critères font l'objet d'hypothèses. Elles permettent toutefois de représenter de manière générale le rôle des éléments du paysage en orientant le choix de l'agent vers des directions avec peu d'obstacles et avec des zones d'intérêt. Nous avons finalement peu développé l'adéquation des valeurs de seuils car nous nous sommes plutôt concentrée sur la fonction (b) de construction de trajectoires par projetés de rayon. Ce serait une perspective de reprendre cette méthode et d'adapter les valeurs de seuils au contexte – espèce, site d'étude –, ainsi qu'aux valeurs des autres paramètres – rayon de prise en compte locale du voisinage, angle total, nombre de parts de cercle. Les valeurs des indices normalisés (comme pour la fonction de sélection d'une destination par l'agent) sont réunies dans la formule de coût de déplacement inversée suivante :

```
Valeur_faveur_déplacement_pour_une_part_de_cercle =
        Somme (des indices en faveur du déplacement)
        + Somme (des indices des obstacles au déplacement)
        + indice sur la direction;
```

Nous n'avons pas ajouté de pondération aux critères de cette fonction, considérant que les 3 critères jouaient un rôle similaire dans le choix de direction. Nous avons cartographié la valeur de cet indice dans l'exemple en Figure IV.19.

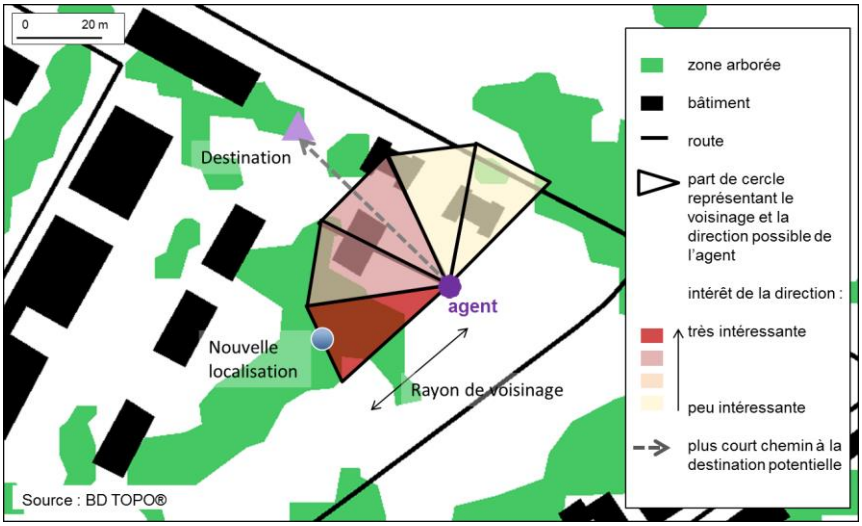


Figure IV.19. La fonction de coût au déplacement : l'agent, ici de l'espèce renard, construit une nouvelle localisation en ayant une perception globale de son voisinage, dans un rayon de 37 m. Il synthétise l'information sur les rôles des éléments du paysage sur le déplacement.

L'algorithme de choix de direction et de détermination de la nouvelle localisation se présente alors comme suit.

```
fonction_de_coût(localisation_n-1, destination, pas_temps,
durée_déplacement)
Initialisation   localisation_n
                angle_total
                 nombre_parts
                 rayon_voisinage = pas_temps * vitesse_moyenne_agent
                 Valeur_min = 0
Fonction de création des objets part_de_cercle (angle_total,
rayon_voisinage, nombre_parts)
   Pour chaque part_de_cercle Faire :
     Valeur_faveur_déplacement_pour_une_part_de_cercle
     Si Valeur_faveur_déplacement_pour_une_part_de_cercle > Valeur_min
Faire :
       Valeur_min = Valeur_faveur_déplacement_pour_une_part_de_cercle
       part_de_cercle sélectionnée
     Fin si
   Fin pour
       localisation_n = localisation_n-1 + (direction et distance de
part_de_cercle sélectionnée)
```

Entre chaque localisation, la distance parcourue est identique. Elle correspond au rayon de voisinage de perception de l'agent lors du déplacement. L'avantage de la fonction de coût définie est qu'elle intègre non seulement les obstacles mais aussi l'intérêt que peuvent représenter les zones traversées. Elle permet d'une certaine manière, de prendre en considération la configuration des éléments du paysage dans la construction de la trajectoire par l'agent. Nous avons effectué quelques tests à partir de cette fonction et des améliorations nous ont semblé possibles, notamment l'adaptation des valeurs de seuil mentionnée plus haut, et le paramétrage de la résolution de lecture de l'espace. En diminuant les parts de cercle dans le voisinage, la considération de l'espace par l'agent serait plus fine et les chemins seraient peut-être plus réalistes (davantage de choix dans les directions possibles, contournement des bâtiments plus réalistes). Ces améliorations demeurent dans nos perspectives.

- La fonction (b) de perception locale : par « projetés de rayon »

Cette fonction utilise comme la fonction (a) de coût au déplacement un rayon de perception du voisinage par l'agent lors de ses déplacements correspondant à la distance normalement parcourue entre deux localisations. La fonction (b) prend en compte les éléments du paysage séparément et ne synthétise pas l'information sur l'influence des éléments du paysage sur une partie de l'espace. L'agent effectue un premier projeté de rayon en direction de sa destination et à une distance égale à son rayon de perception du voisinage : il s'agit d'un segment de trajectoire théorique. Le long de ce projeté de rayon, c'est le premier obstacle rencontré, le plus proche de l'agent, qui peut dévier sa trajectoire. Deux types d'obstacles existent : ceux pouvant être traversés et ceux qui sont hermétiques. Ceux pouvant être traversés sont associés à des probabilités de traversée comprises entre 0 (pas de traversée possible) et 1 (traversée immédiate et sans déviation de la trajectoire). Les éléments du paysage constituant l'environnement agent et pris en compte comme obstacle sont listés ci-dessous.

- Les obstacles franchissables pouvant dévier le déplacement d'un agent

- Les voies de communication : routes et chemins. La probabilité de traversée est définie selon le type de voie. Par défaut, les autoroutes ont une probabilité de traversée faible et les chemins

une probabilité élevée traduisant le fait qu'ils fassent peu obstacle au déplacement. Des valeurs sont définies par défaut, mais elles sont paramétrables par espèce et selon le type de routes.

Autoroute et bretelle d'autoroute → probabilité = 0,1
Route à 2 chaussées → probabilité = 0,2
Route à 1 chaussée → probabilité = 0,3
Route non goudronnée → probabilité = 0,8
Chemin et sentier → probabilité = 1,0

Ces valeurs sont issues d'une estimation ordonnée de l'effet de barrière des routes en fonction de leur type (largeur et revêtement).

- Les voies ferrées : la probabilité est définie selon le type d'exploitation des voies (à grande vitesse, principale, de service, non exploitée). La valeur par défaut est faible car les voies ferrées font obstacle aux déplacements en limitant les traversées, comme observé dans notre cas d'étude sur les renards en milieu périurbain.

Voie ferrée → probabilité = 0,1

- Les cours d'eau : une probabilité est fixée quel que soit le cours d'eau, valeur moyenne hypothétique mais traduisant le fait que les cours d'eau peuvent constituer une barrière parfois difficile à franchir à cause de ses différentes caractéristiques (largeur, profondeur, berge).

Cours d'eau → probabilité = 0,5

- La pente : au-dessus d'une somme de pente supérieure à un certain seuil le long du segment de trajectoire théorique (par défaut 50 degrés sachant que les pentes sont connues tous les 25 m), une probabilité d'emprunter la direction correspondante est définie (par défaut 0,5).

- Les obstacles hermétiques ne pouvant être traversés et déviant le déplacement

- Les bâtiments : au vu de la forme complexe de certains bâtiments et par mesure de simplification des calculs, nous avons considéré le contour convexe des bâtiments.
- Les plans d'eau.

Pour ces obstacles, la probabilité de traversée est égale à 0 dans tous les contextes de simulation.

L'agent définit sa trajectoire en ligne droite théorique vers sa destination. Pour le premier obstacle rencontré, la méthode suivante est mise en place pour traduire les probabilités de traversée des obstacles : une valeur est générée aléatoirement entre 0 et 1, qui est l'intervalle de valeur des probabilités de traversée des obstacles. Si la valeur est inférieure à la probabilité de traversée, alors l'obstacle peut être traversé. Sinon, l'agent doit dévier sa trajectoire. Il dévie sa trajectoire sur une même distance en essayant alternativement les directions de chaque côté de sa direction initiale jusqu'à ce qu'il ne rencontre plus d'obstacle (déviation de 1° de chaque côté alternativement). Une nouvelle localisation est calculée. À partir de cette nouvelle localisation, l'agent réessaye de se diriger vers sa destination : il peut soit traverser l'obstacle si la valeur générée aléatoirement est à présent inférieure à la probabilité de traversée de l'élément du paysage, soit dévier à nouveau sa trajectoire, voir le schéma en Figure IV.20.

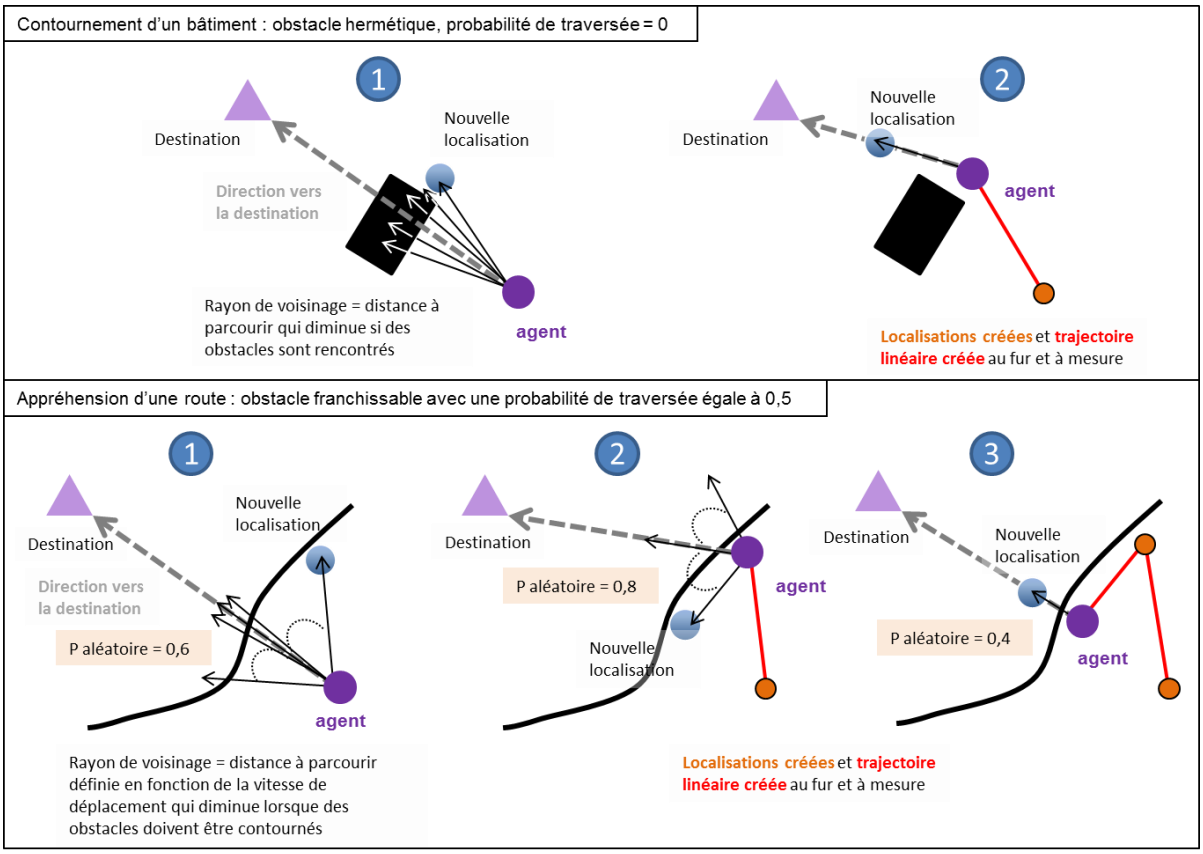


Figure IV.20. Principe de la fonction par projetés de rayon : cas des bâtiments et des routes. Dans les deux cas, un projeté de rayon est effectué en commençant par la direction vers la destination puis alternativement selon un petit angle de chaque côté ce cette direction jusqu'à ce que l'obstacle ne soit plus rencontré. Dans le cas des routes, la traversée est possible sans déviation si la probabilité aléatoire (P) est inférieure à la probabilité de traversée de la route.

Dans cette méthode, la vitesse diminue en fonction du contournement des obstacles précédemment rencontrés qui entraînent des détours dans la trajectoire d'un agent. Le rayon de perception du voisinage par l'agent lors de ses déplacements diminue donc également, par défaut avec un facteur multiplicatif de 0,9, qui est un facteur relativement faible évitant que les distances de déplacement diminuent trop rapidement. Si aucun obstacle n'est rencontré, la vitesse peut augmenter par défaut selon un facteur de 1,1 jusqu'à sa vitesse moyenne. L'algorithme de déviation de la trajectoire est présenté ci-dessous.

```
déviation_trajectoire(localisation_n-1, destination, distance, obstacle)
Initialisation   probabilité_obstacle
                 n_angle_déviation = 0
  probabilité_traversée = génération d'un nombre aléatoire entre 0 et 1
  Si Probabilité_traversée < Probabilité_obstacle Faire :
     localisation_n = localisation_n-1 + distance dans la direction de la
destination
  Sinon Faire :
    Tant que obstacle entre localisation_n-1 et localisation_n_theorique
Faire :
      localisation_n_theorique = localisation_n-1 + distance dans une
direction déviée de n_angle_dévation
      n_angle_déviation = n_angle_déviation + 1
    Fin tant que
  Si aucune localisation_n_theorique construite Faire :
```

```
    Diminution de la distance et réitération de la méthode
déviation_trajectoire
  Fin si
```

Si aucune localisation suivante n'est construite par l'agent car il ne trouve pas de chemin sans obstacle ou une possibilité de traversée alors la vitesse peut diminuer jusqu'à 0,1 km/h pour correspondre à une petite distance à parcourir dans le pas de temps de simulation (pour 1 min : 1,7 m). Si aucune localisation ne peut être finalement construite, alors l'agent change de destination. La Figure IV.21 représente un environnement agent constitué uniquement de bâtiments, modélisés par leur enveloppe convexe, et de routes de type une chaussée. Les bâtiments sont des obstacles hermétiques alors que les routes sont ici toutes associées à une probabilité de traversée de 0,5. Dans cet exemple, la destination est définie par un point au niveau d'un bâtiment en bas à gauche de la carte.

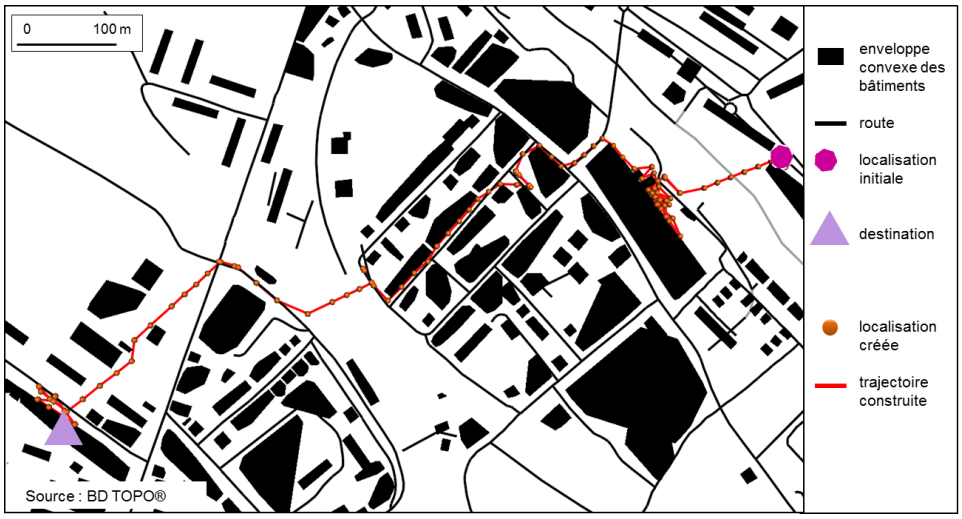


Figure IV.21. La fonction par projetés de rayon. Exemple de la construction d'une trajectoire par un agent dans un environnement composé de bâtiments et de routes.

En Figure IV.21, on voit que la construction de la trajectoire par la fonction (b) peut générer des agrégats de points, par exemple autour du premier bâtiment rencontré par l'agent. La forme de la trajectoire n'est pas forcément réaliste mais cet agrégat traduit le temps passé à essayer de contourner l'obstacle. L'algorithme de projetés de rayon module la vitesse de déplacement et donc la distance parcourue par l'agent pendant un intervalle de temps de simulation identique. Les distances parcourues sont plus petites proches des bâtiments et des routes, elles sont identiques sinon. Dans l'exemple, une fois la destination atteinte, l'agent reste à proximité du bâtiment correspondant. L'algorithme se présente comme suit.

```
projetés_de_rayon(localisation_n-1, destination, pas_temps,
durée_déplacement)
Initialisation    localisation_n
                  distance_entre_n-1_et_n = pas_temps *
vitesse_moyenne_agent
                  rayon_voisinage = distance_à_parcourir_n
                  localisation_n_theorique = localisation_n-1 +
distance_entre_n-1_et_n dans la direction de la destination
  Si obstacle entre localisation_n-1 et localisation_n_theorique Faire :
    déviation_trajectoire(localisation_n-1, destination, distance_entre_n-
1_et_n, obstacle)
    distance_entre_n_et_n+1 = facteur_réduction * distance_entre_n-1_et_n
```

```
  Sinon Faire :
    localisation_n = localisation_n-1 + distance_entre_n-1_et_n dans la
direction de la destination
    distance_entre_n_et_n+1 = facteur_augmentation * distance_entre_n-
1_et_n
  Fin si
```

Dans cette fonction par projetés de rayon, nous n'avons pas considéré les éléments favorables aux déplacements dans la perception locale mais uniquement lors de la sélection de la destination par l'agent. Nous pourrions prendre en compte ces éléments favorables, par exemple pour freiner la vitesse de l'agent qui exploiterait ces éléments. Dans le modèle défini, cette exploitation est traduite par la sélection des destinations. Les probabilités de traversée sont remplies par défaut, mais elles sont paramétrables. Cette modélisation de la notion d'obstacle permet d'ajuster l'influence des éléments du paysage sur les animaux en fonction des connaissances. Cette méthode nous permet également de prendre en compte l'audace définie comme propriété des agents-animaux. L'audace fait qu'un animal traverse un obstacle même si celui-ci est a priori dangereux et freine ses déplacements, et elle a été définie comme augmentant ou diminuant les probabilités de traversée paramétrées.
Nous avons également intégré à la fonction une autre détermination des distances parcourues par l'agent. Il s'agit de s'appuyer sur des distributions de fréquence des vitesses observées pour une même espèce et sur un même type d'espace. Nous avons toutefois utilisé principalement la première méthode de décélération ou d'accélération de la vitesse de déplacement de l'agent selon la rencontre avec des obstacles.

- Comparaison des 2 fonctions (a) « fonction de coût », et (b) « projetés de rayon »

Les deux algorithmes de déplacement développés prennent en compte différemment l'influence de l'espace sur les déplacements d'animaux à partir des données géographiques. La fonction (a) peut être assimilée à une prise en compte à moyenne échelle des données géographiques car elle agrège certaines informations spatiales, alors que la fonction (b) prend en compte les données géographiques à grande échelle spatiale. Lors des analyses de données, nous avions privilégié la prise en compte des données à grande échelle spatiale afin de rechercher des relations entre localisations observées et données géographiques. Les résultats des analyses sont toutefois utilisés dans les deux méthodes pour pondérer l'influence différente des éléments du paysage sur les déplacements et pour déterminer les vitesses et les rythmes de déplacements moyens des espèces animales. La Figure IV.22 montre le résultat des deux fonctions (a) et (b) de déplacement pour un agent de l'espèce renard à partir d'une même localisation initiale. La destination est identique : le point d'un contour d'une zone arborée.

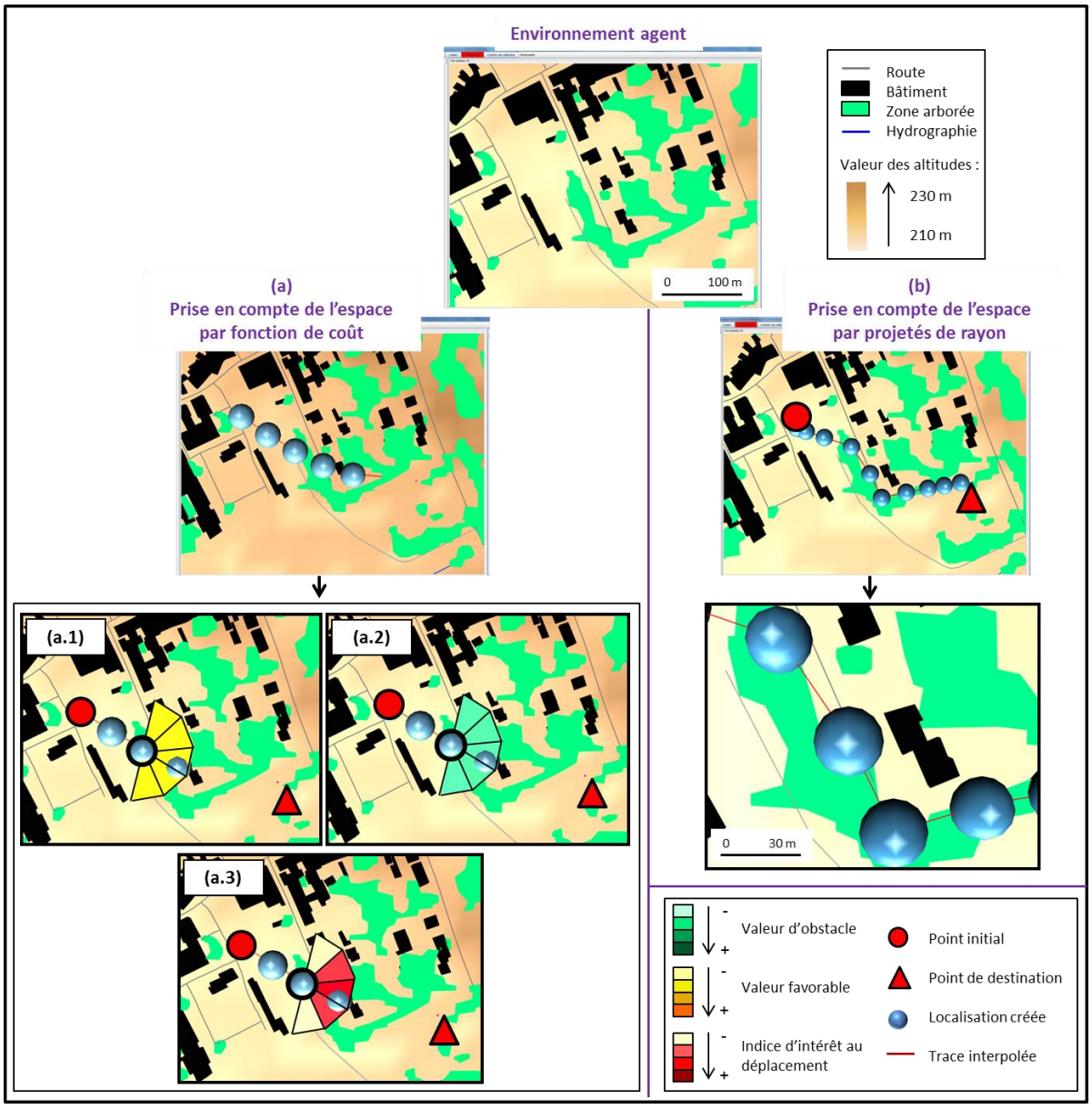


Figure IV.22. Comparaison entre les deux méthodes de déplacement : (a) fonction de coût. En a.1 : portions de cercle selon la présence des routes et des bâtiments, obstacles aux déplacements, en a.2 : portions selon la présence de végétation qui est considérée comme favorable, en a.3 : indice de la fonction de coût aux déplacements prenant en compte les obstacles, les éléments favorables et la direction vers la destination ; (b) projetés de rayon : les bâtiments sont contournés et les routes à une chaussée sont traversées selon une probabilité de 0,5.

Sur la figure précédente, la distance de perception du voisinage spatial lors des déplacements est initialement de 50 m et le pas de temps de simulation est de 1 minute, la vitesse moyenne de l'agent étant de 3 km/h. Nous avons défini l'environnement agent avec les routes à une chaussée, les bâtiments et les zones arborées. Les pentes étant quasi égales sur cette zone, nous considérons que ce facteur n'a pas d'influence. La prise en compte de l'influence du paysage sur les déplacements par fonction de coût (a) est montrée en Figure IV.22.a. L'angle de perception est de 180° et il y a 5 directions considérées correspondant à 5 parts de cercle. Sur l'exemple pris de la 3ème localisation de la trajectoire, les parts de cercle correspondent à une présence similaire en obstacles, c'est-à-dire compris dans le même intervalle de valeurs (a.1 en jaune), et en éléments du paysage favorables au déplacement (a.2 en vert). Seule la direction influence la

valeur de la fonction de coût (a.3) : la direction vers la destination est donc privilégiée. Pour l'ensemble des points créés, l'influence principale est en fait ici la direction vers la destination, ce qui fait que la trajectoire est rectiligne entre la localisation initiale et la destination. Cette trajectoire est peu réaliste car elle évite les zones arborées et butent sur un bâtiment. La Figure IV.22.b montre la méthode par projetés de rayon (b). Les bâtiments et les routes font dévier la trajectoire et influencent la vitesse de déplacement. Plus de localisations sont créées pour la trajectoire : 10 localisations, alors que 5 localisations étaient générées par la méthode (a). Les deux méthodes offrent une prise en compte de l'espace différente, globale et locale et sont donc complémentaires. Nous nous concentrons toutefois lors de nos tests (en IV-3 et IV-4) sur la méthode (b) qui prend en compte plus précisément les éléments du paysage et leur configuration. Nous observons en effet dans cet exemple que la méthode (b) rend mieux compte du comportement spatial de l'agent qui fait passer sa trajectoire par des zones arborées dans un espace très fragmenté alors qu'il évite les nombreux obstacles plus ou moins franchissables. En revanche la méthode (a) en calculant l'intérêt (coût inversé) de déplacement sur des unités spatiales assez grossières (sur la figure précédente, la surface d'une part de cercle est de 785 m²) tend à lisser l'hétérogénéité des simulations qui sont moins réalistes.

L'état d'exploitation d'une destination

Lorsque l'agent a atteint sa destination, il l'exploite pendant une certaine durée, ce qui correspond à son état (2) (voir Figure IV.15). L'élément du paysage de destination dépend de son activité. Pour un renard :
- le repos est associé aux zones arborées ;
- la recherche de ressources et leur exploitation est associée aux zones arborées et aux bâtiments.

Pour les cervidés, les deux phases repos et recherche/exploitation de ressources sont toutes deux associées aux zones arborées.
Dans la phase d'exploitation, l'agent parcourt les zones arborées et reste à proximité des bâtiments, comme décrit par l'algorithme suivant. Pour les zones arborées, les points de contour sont choisis aléatoirement comme destination. Une fois atteinte, un nouveau point de contour est choisi, et ceci jusqu'à ce que la durée d'exploitation de la destination soit écoulée. Concernant les bâtiments, l'agent choisit également des points de contour comme destination, sauf qu'il les atteint par l'extérieur car il ne peut parcourir les bâtiments. Nous avons fixé la durée d'exploitation de la destination pour les renards par défaut dans le système à 10 min, et pour les cervidés à 1 h car ceux-ci sont moins mobiles que les renards.

```
exploite_destination(localisation, destination, pas_temps,
durée_exploitation, méthode_déplacement)
Initialisation   point_destination = point_coutour de destination choisi
aléatoirement
   Si destination est une zone arborée ou un bâtiment Faire :
      Tant que destination n'est pas atteinte
         calculTrajectoire (localisation, destination, pas_temps,
durée_exploitation, méthode_déplacement)
      Fin tant que
      point_destination = nouveau point_coutour de destination choisi
aléatoirement
   Fin si
```

L'agent revient ensuite à l'état (1) lorsque la durée d'exploitation est écoulée. Il définit un nouvel élément du paysage comme destination et s'y dirige.

2.4. L'implémentation informatique du modèle orienté agent

Nous avons développé un module de simulation dans lequel est proposé le processus de simulation contenant les différentes méthodes de sélection de destination et de déplacement. Ce module nous permet de tester les algorithmes proposés. Nous présentons les ressources logicielles que nous avons choisies pour implémenter notre modèle et créer un simulateur, c'est-à-dire un programme capable de lancer des simulations de déplacements. La modélisation orientée agent se traduit dans un environnement informatique par une programmation orientée objet. Un objet possède des attributs et des méthodes. L'implémentation intègre les propriétés et les comportements des agents définis précédemment traduisant les contraintes intrinsèques aux espèces et les contraintes spatiales.

Développement du module dans le plateforme GeOxygene

Nous avons utilisé la plateforme SIG GeOxygene (Badard & Braun, 2004) développée en Java afin d'implémenter notre modèle agent. Les fonctions SIG de cette plateforme permettent de prendre en compte les données géographiques en format vecteur et de mener des opérations d'analyses spatiales sur les trajectoires créées. Ce cadre de développement offre la possibilité de lancer les algorithmes implémentés et de visualiser les résultats de trajectoires. Cela permet de tester les algorithmes et l'influence des valeurs attribuées aux paramètres. Le module de simulation développé est intégré au module de visualisation des données et d'analyse des relations entre l'espace et les déplacements correspondant aux analyses décrites dans le chapitre III.
Nous avons présenté le modèle de données conceptuel en IV-1.2. Nous décrivons sa traduction dans notre modèle implémenté qui reprend les classes définies. Le principe de l'implémentation est qu'une classe du modèle UML (Figure IV.6.) correspond à une classe en code Java. Les trois classes principales reprennent celles du modèle conceptuel

- La classe *Carte* est implémentée : un objet *Carte* correspond à un espace d'analyse délimité par une certaine emprise spatiale (un site d'étude). Cet objet répertorie les données de description de l'espace chargées dans le module ainsi que les données de déplacements.
- La classe *Individu* : c'est la classe qui hérite des comportements d'*espèce animale* et la classe *Agent* hérite de cette classe.
- La classe *Trajectoire* : les objets *Trajectoire* correspondent aux déplacements interpolés à partir des localisations observées ainsi qu'aux déplacements résultant des simulations agent.

L'ensemble des classes codées est organisé en cinq groupes, appelés packages.

- Le package *modèle* contient les classes correspondant au modèle de données conceptuel dont *Carte*, *Animal* et *Trajectoire*.
- Le package *datagéo* appelle les bases de données de description de l'espace et les localisations observées correspondant à la *Carte*.
- Le package *analyses* est consacré aux fonctions d'analyse des déplacements, de l'espace, et des relations déplacement-espace.
- Le package *gui* concerne l'interface graphique s'appuyant sur l'interface GeOxygene 3D (Brasebin, 2009). Nous avons ajouté un menu appelant les fonctions d'analyse de données et les fonctions de simulation (voir la Figure IV.24).
- Le package *sma* contient les fonctions de définition des agents, de l'environnement agent et des paramètres de simulation ainsi que les méthodes du processus de simulation dont la méthode de construction de trajectoires.

En Figure IV.23, nous pouvons visualiser l'interface de développement Eclipse et nos packages s'appuyant sur GeOxygene. La classe *LauncherGeOxygene3D* permet de lancer l'interface personnalisée de visualisation intégrée à GeOxygene 3D. Elle ajoute le menu d'appel des méthodes de visualisation, d'analyse et de simulation des déplacements.

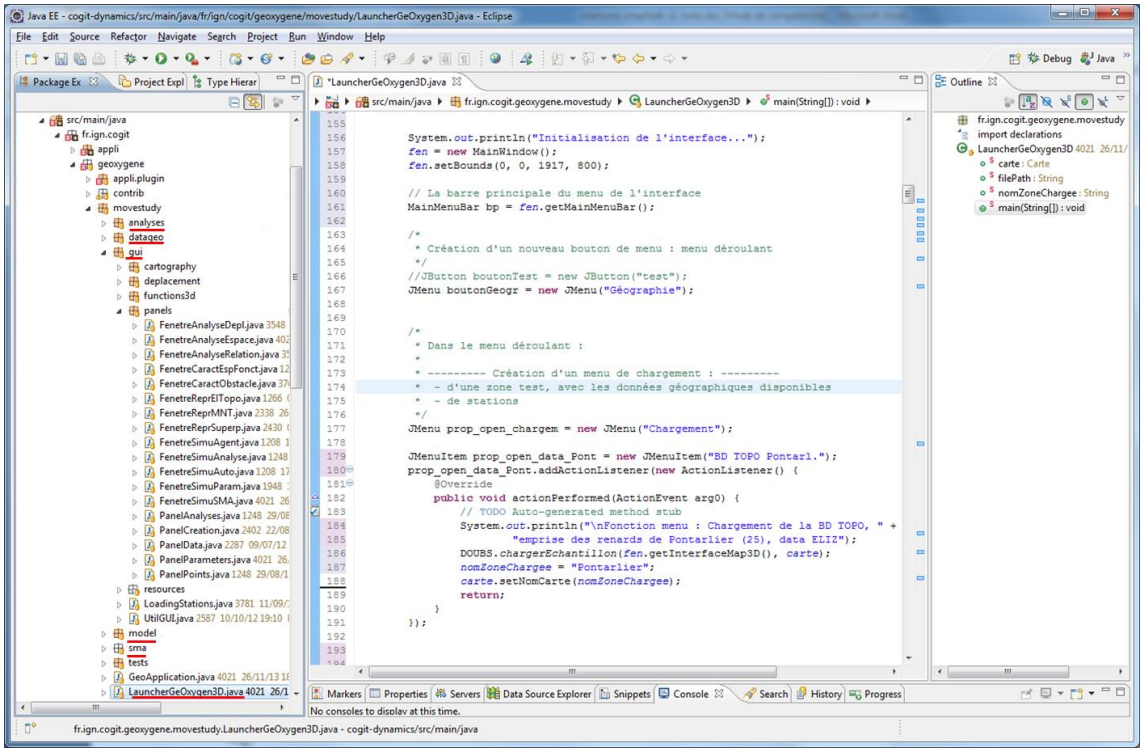


Figure IV.23. Le SIG GeOxygene et l'implémentation dans Eclipse des classes organisées en cinq packages surlignés en rouge : *analyses* contenant les fonctions d'analyses de données, *datagéo* qui référencent les données géographiques et les données de déplacements, *gui* pour l'interface graphique, *modèle* implémentant les classes du modèle conceptuel de données, et *sma* pour le module agent. Une partie du code de la classe LauncherGeOxygene3D.java est affichée dans la fenêtre centrale.

Concernant le module de simulation des trajectoires, une fenêtre de paramétrage est éditable (voir la Figure IV.24). Les paramètres de simulation correspondent aux propriétés et aux comportements agent, en particulier l'espèce animale correspondant à l'agent se déplaçant et la vitesse moyenne de déplacement. Ils concernent également la définition de l'environnement agent : prise en compte des éléments du paysage et modification de leur rôle attribué par défaut (par exemple modification du rôle d'obstacle d'une route en élément favorable au déplacement). La fenêtre de paramétrage permet enfin de choisir les paramètres de simulation généraux : le pas de temps de simulation, le mode de déplacement (exploratoire ou vers une destination fixée), la méthode de calcul de la trajectoire (fonction de coût ou par projetés de rayon). Des valeurs des paramètres sont remplies par défaut. Nous effectuerons des tests sur certains paramètres dans la partie IV-3. La Figure IV.24 montre l'affichage dans l'interface du MNT, des routes et des chemins sur le site d'étude des Vosges.

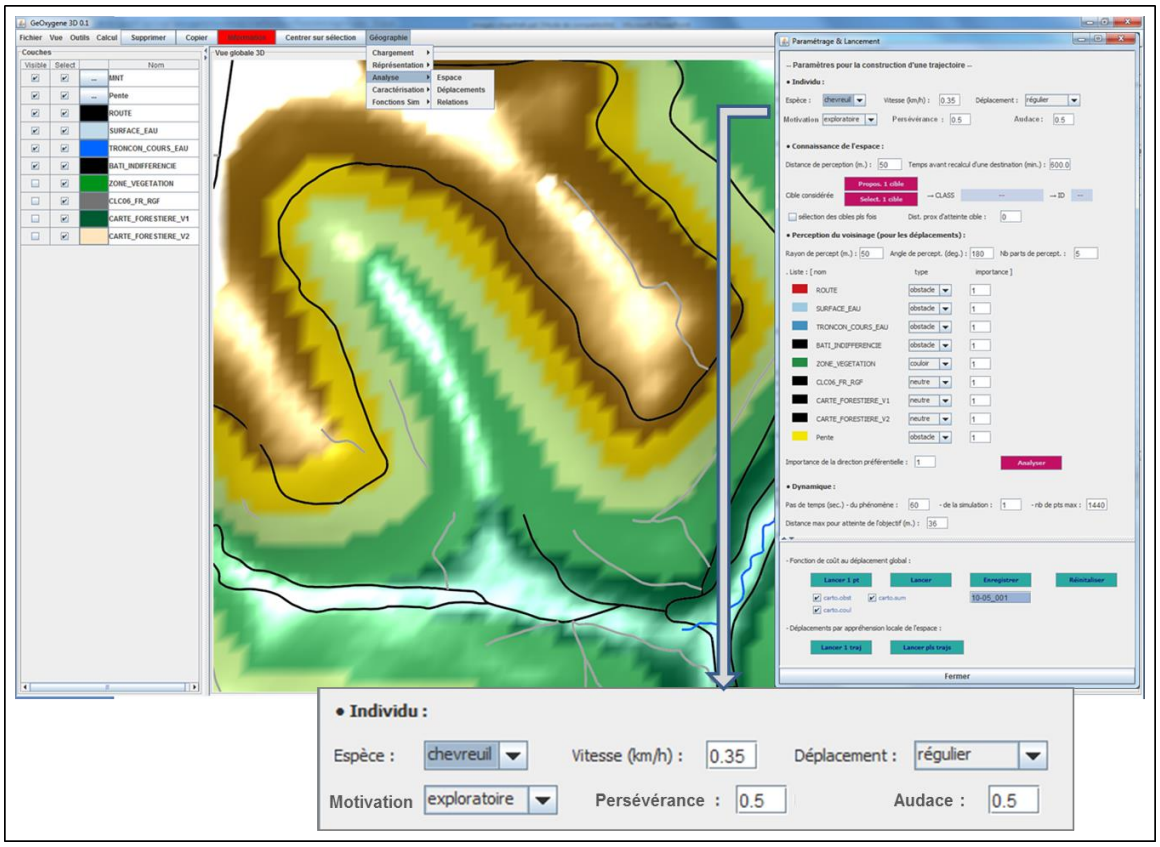


Figure IV.24. L'interface graphique de GeOxygene 3D complétée avec le menu appelant le module d'analyse et de simulation agent. La fenêtre présentée est celle de définition des paramètres de simulation et le zoom concerne une sélection des propriétés éditables de l'agent.

La fenêtre de paramétrage située à droite sur la figure est éditable. Par exemple, les propriétés de l'agent modifiables sont :

- son espèce ;
- sa vitesse moyenne ;
- son rythme de déplacements (« déplacement ») : ses phases alternées de repos et de recherche de ressources sont « régulières », c'est-à-dire qu'elles sont alternées toutes les heures et ne suivent pas le rythme défini par défaut pour son espèce animale ;
- son mode de déplacement (« motivation ») : exploratoire ou vers une destination définie ;
- la persévérance : facteur réduisant ou augmentant la durée avant que l'agent ne renonce à sa destination choisie ;
- l'audace : facteur multiplicatif réduisant ou augmentant les probabilités de traversée des obstacles.

Il est également possible d'éditer la prise en compte des éléments du paysage, notamment les probabilités de traversée des routes et la somme maximale des pentes pouvant être parcourue pendant le pas de temps de simulation.

L'enregistrement des résultats de simulation

Nous relions le module de simulation développé dans GeOxygene à une base de données dans le SGBD PostGIS. Cette base stocke les valeurs définies des paramètres ainsi que les trajectoires qui sont les résultats de simulation. La structure de cette base de données est présentée en Figure IV.25. Elle contient les classes décrites comme suit.

- Les classes consacrées à la simulation de trajectoires :
  - les agents construits et leurs propriétés ;

- l'environnement agent qui correspond à la liste des données géographiques chargées dans la scène et aux agents créés ;
- les paramètres de simulation comme le pas de temps de simulation et la méthode de construction de déplacement ;
- la localisation initiale de l'agent qui correspond au premier point de sa trajectoire construite. Il peut s'agir d'une localisation observée ou d'une localisation fictive ;
- les probabilités de traversée des obstacles, comprises entre 0 (obstacle non traversable) et 1 (équivaut à une absence d'obstacle). Les probabilités sont définies pour les voies ferrées possiblement selon leur type d'exploitation, pour les routes et chemins selon leur nature, pour les cours d'eau et pour la pente. Nous testerons principalement l'influence de la probabilité de traversée des routes ;
- les résultats des simulations : les trajectoires construites par l'agent et constituées de localisations avec les trois coordonnées spatiales et une coordonnée temporelle.

- Lorsque les trajectoires sont calculées par les agents et sont enregistrées dans la base de données, nous les analysons afin de vérifier la cohérence et le réalisme des déplacements simulés. Les classes sur l'analyse des trajectoires construites contiennent alors des indices utiles pour comparer les résultats entre eux et avec les observations :
  - les indices sur la forme des trajectoires : la longueur totale, les longueurs des segments et les angles relatifs entre les segments ;
  - les indices de caractérisation des trajectoires par rapport aux éléments du paysage : le pourcentage de localisations incluses dans les zones arborées, la situation des localisations dans les valeurs de pentes, les distances moyennes entre les localisations et les voies de transport, puis entre les localisations et les bâtiments, la superficie de l'espace parcouru estimé par enveloppe convexe minimale.

- Les analyses des trajectoires simulées s'appuient sur la comparaison avec les déplacements observés. Les classes contenant les informations relatives aux trajectoires issues des observations ainsi que les données de description des éléments du paysage :
  - les informations sur les suivis des animaux dont sont extraits les échantillons de données de déplacements : propriétaire des données, durée de suivi, technique de suivi (GPS, VHF) ;
  - les informations sur les animaux suivis ;
  - le site d'étude (emprise) ;
  - les localisations enregistrées avec les coordonnées et les informations sur l'enregistrement (pour le GPS : nombre de satellites par exemple) ;
  - les données de description de l'espace par thème et avec leurs attributs.

La Figure IV.25 montre ces différentes classes, les attributs principaux et leurs relations.

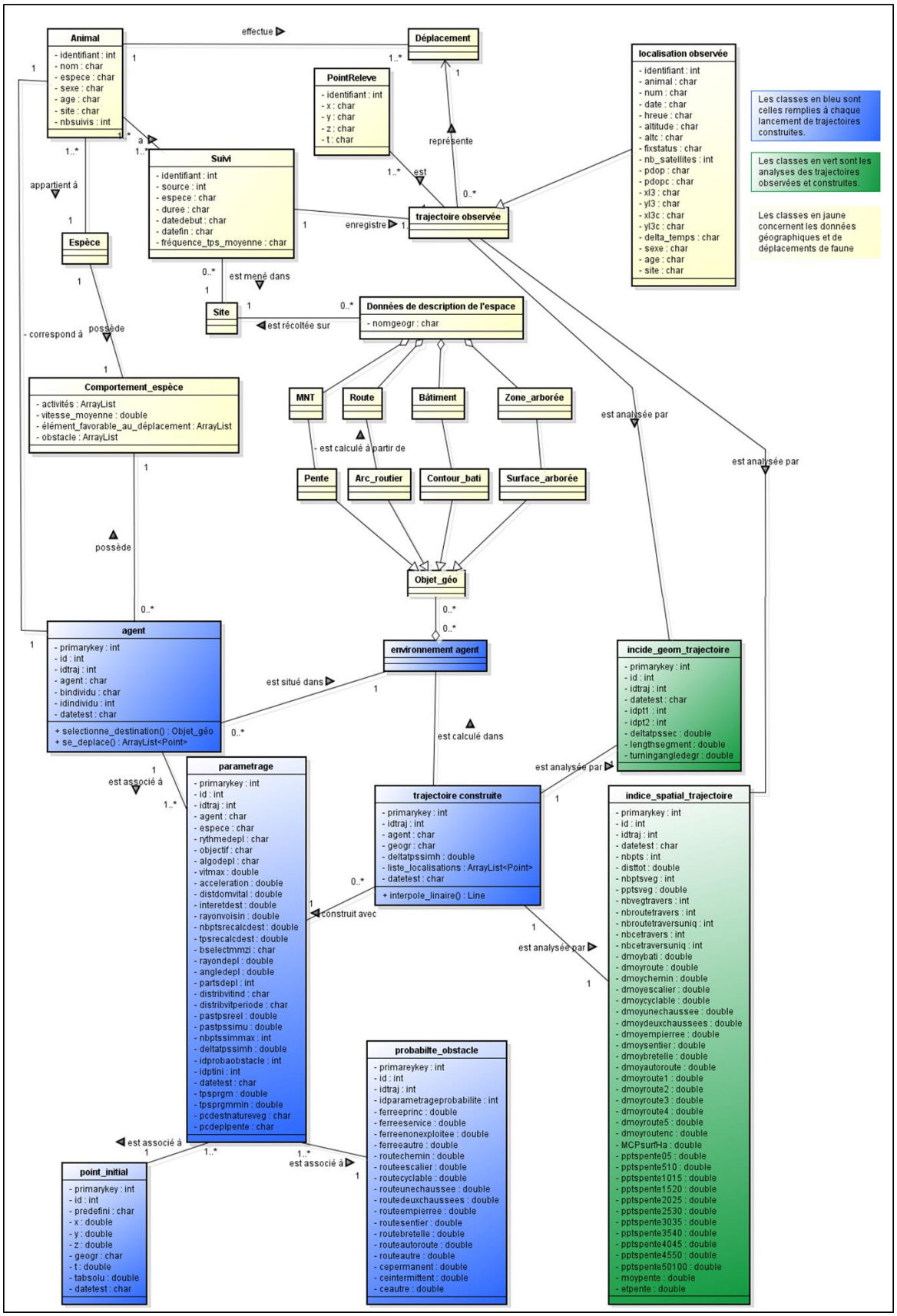


Figure IV.25. Le modèle de la base de données écrit dans le logiciel Astah et implémenté dans PostGIS : les localisations enregistrées et les données géographiques ainsi que les trajectoires créées et les paramètres agent définis pour les lancer.

Des identifiants uniques permettent de faire le lien entre les classes de données, par exemple entre les agents et leurs trajectoires simulées ou entre la définition des paramètres de simulation, les localisations initiales des agents et les probabilités de traversée des obstacles. La Figure IV.26 montre l'interface pgAdmin III de PostGIS par laquelle nous avons créé les tables stockant les paramètres de simulation et les trajectoires construites. Les tables de données enregistrées dans PostGIS peuvent ensuite être lues dans les SIG GeOxygene et Quantum GIS.

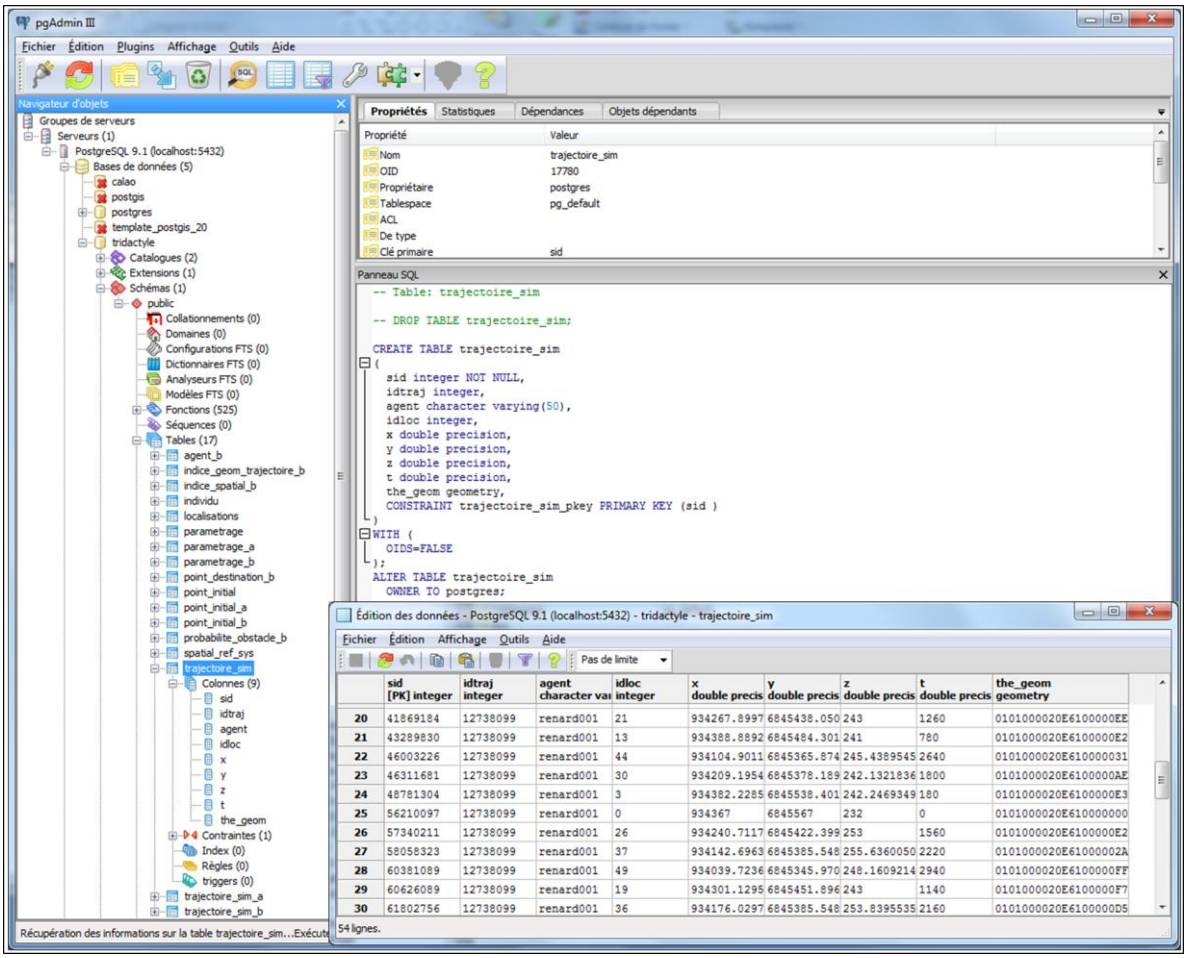


Figure IV.26. L'interface graphique pgAdmin III et les tables implémentées dans PostGIS. La table affichée est un extrait de dix lignes de celle des trajectoires construites. Les attributs sont renseignés et une colonne consacrée à la géométrie est propre à PostGIS.

Le module informatique implémenté, il est à présent possible de réaliser des simulations de trajectoires et de visualiser les résultats. Nous allons utiliser ce module pour effectuer des tests sur les paramètres de simulation puis pour comparer les simulations résultantes avec les observations.

3) EXPÉRIMENTATIONS ET ANALYSE CRITIQUE DU MODÈLE EN VUE DE SON AMÉLIORATION

Un des avantages de la modélisation et de la simulation proposée est d'offrir la possibilité de modifier l'espace à partir des données numériques puis d'évaluer les conséquences de ces modifications sur les trajectoires simulées. Avant de modifier l'espace, nous testons le modèle en lançant des trajectoires et en les comparant avec les connaissances et les observations sur les déplacements. Ces tests ont un but expérimental et servent à identifier quel est le réalisme des trajectoires simulées et en quoi le modèle pourrait être amélioré. Nous nous intéressons au rôle des éléments du paysage lors des déplacements des espèces animales (renard, chevreuil, cerf), c'est-à-dire les chemins empruntés par les animaux. Notre démarche est la suivante.

1) Nous lançons dans un premier temps la simulation de trajectoires afin de visualiser si celles-ci sont cohérentes (parties IV-3.1 et 3.2) : pour les renards en milieu périurbain et pour les chevreuils et les cerfs en milieu forestier.

2) Nous testons ensuite la sensibilité du modèle aux valeurs des paramètres. Pour cela, nous nous concentrons sur des contextes de simulation identiques en faisant varier la valeur d'un seul paramètre et nous regardons les conséquences sur les trajectoires (parties IV-3.3). Tous les paramètres ne sont pas testés mais nous nous concentrons sur ceux qui nous paraissent importants.

3) Nous analysons les résultats de simulation pour plusieurs scénarios de tests, comme résumé en Figure IV.27 (parties IV-3.4 et 3.5) :

- sur un même site d'étude pour une même espèce avec une définition de l'environnement agent différent ;
- sur plusieurs sites d'étude pour une même espèce ;
- sur un même site d'étude pour une espèce, puis pour plusieurs espèces afin de comparer les différences d'utilisation de l'espace entre les comportements modélisés. Nous testons également les deux motivations aux déplacements que nous avons considérées dans le modèle : exploratoire ou vers une destination fixe prédéfinie.

Les sites correspondent aux cas d'étude, sauf un site en dehors sur lequel est simulée la mise en place d'aménagements présentée en IV-4.

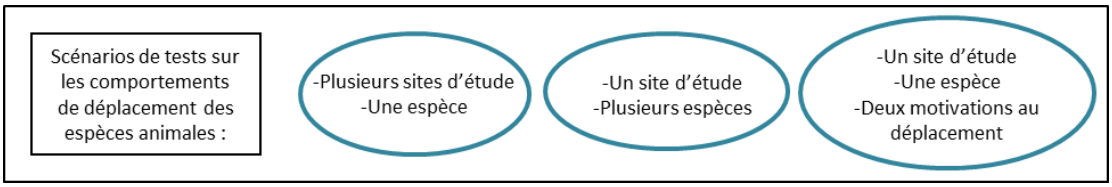


Figure IV.27. Les expérimentations menées afin de visualiser les résultats du modèle de simulation. Entre les scénarios de tests, nous modifions : les sites d'étude, les espèces animales et les motivations au déplacement.

Comme la construction des trajectoires est non déterministe, le protocole pour analyser les résultats de simulation s'appuie sur le lancement de plusieurs trajectoires pour un même agent associé à un même paramétrage. Le nombre de trajectoires lancées est au minimum de 30, ce qui est significatif pour les analyses et qui permet de lancer les simulations pendant une durée raisonnable de moins d'une demi-journée. Afin d'analyser les résultats, nous nous appuyons sur :

- une comparaison qualitative des trajectoires simulées avec celles observées ;
- des mesures quantitatives sur la forme des trajectoires et sur les relations entre trajectoires et éléments du paysage ;
- le retour d'écologues sur le réalisme des simulations, point que nous aborderons dans la partie IV-5.

3.1. Simulation de trajectoires et comparaison avec les déplacements observés : le cas des renards en milieu périurbain

Avant d'étudier la sensibilité du modèle de simulation aux paramètres, nous lançons des simulations de trajectoires afin de comparer les résultats avec les observations. Nous nous concentrons sur les trajectoires de renards et nous reprenons le site d'étude de l'agglomération de Nancy. Nous nous intéressons aux déplacements de rythme quotidien. La durée d'une trajectoire est paramétrée à une journée, soit 24 heures. Une trajectoire comprend des phases d'activités : repos et recherche (et exploitation) de ressources. Dans ce premier test, 30 trajectoires sont construites par un même agent de l'espèce renard, avec un même paramétrage. Pour le déplacement d'un agent, il y a donc 30 alternatives de trajectoire associées.

Le test a consisté à appliquer un même paramétrage à quatre agents différents. Pour chacun de ces quatre agents, nous avons attribué la localisation initiale de l'un des quatre renards suivis par l'Anses, située dans son espace parcouru. L'environnement agent correspond au rectangle englobant de 1 km autour des localisations du renard suivi sur le site. Nous pourrons alors comparer si l'agent parcourt le même espace que celui parcouru effectivement par le renard. Les valeurs des paramètres de construction de trajectoires sont indiquées dans le Tableau IV.3. Ces paramètres sont :

- le nombre d'agents créés : un agent est créé par simulation et cet agent construit une ou plusieurs trajectoires ;
- l'espèce animale à laquelle correspond l'agent : ici, le renard ;
- le rythme de déplacements est nommé « régulier », cela signifie que les activités sont alternées toutes les heures entre repos et recherche de ressources. Ce rythme n'est pas habituel pour le renard, mais pendant 24 h, cela correspond à la moitié du temps passé en phase repos (diurne) et l'autre moitié en phase de recherche (nocturne). Nous nous sommes concentrée sur les chemins empruntés par les agents dans plusieurs espaces plus ou moins aménagés, ce qui nous a fait privilégier un rythme soutenu de déplacement ;
- la motivation de l'agent est le déplacement exploratoire, c'est-à-dire que l'agent ne cherche pas à atteindre une destination fixe prédéfinie ;
- le nom de la méthode de construction de trajectoires : ici par projetés de rayon ;
- le pas de temps de simulation est de 1 minute. La distance qui sépare deux localisations successives de l'agent est calculée à partir de cette durée et de la vitesse moyenne de l'agent ;
- le nombre maximal de points construits d'une trajectoire : ce paramètre représente la durée totale d'une simulation, une journée comptabilise 1440 localisations créées chaque minute ;
- la vitesse moyenne de l'agent est ici de 2,2 km/h. Elle diminue si l'agent change de direction lors de la rencontre d'un obstacle ;
- la persévérance est ici de 1 : la durée avant que l'agent ne change sa destination même s'il ne l'a pas atteinte, n'est pas modifiée ;
- l'audace est fixée à 1 également : l'agent traverse les obstacles franchissables selon la probabilité définie par défaut ;
- le rayon de perception est la distance maximale à laquelle les éléments du paysage sont perçus par l'agent. C'est dans ce rayon que les destinations sont choisies ;
- la sélection possible d'une même destination est un booléen. Si celle-ci n'est pas possible, cela signifie que l'agent choisit en priorité des destinations qu'il n'a pas encore atteintes et exploitées.

Les probabilités de traversée les routes sont celles par défaut : 0,3 pour les routes à une chaussée et 0,2 pour les routes à deux chaussées. Les voies ferrées sont associées à une probabilité de traversée de 0,1 et les cours d'eau de 0,5.

Tableau IV.3. Les valeurs des paramètres pour le test de simulation de trajectoires de renards sur le site d'étude de l'agglomération de Nancy.

Nombre d'agents créés	Espèce animale	Rythme de déplacements	Motivation	Méthode de déplacement	Pas de temps de simulation (sec.)	Nombre maximal de points construits
1	renard	régulier	exploratoire	projetés de rayon	60	1440

Vitesse moyenne (km/h)	Persévérance	Audace	Rayon de perception (m.)	Durée max avant un changement de destination (min)	Sélection d'une même destination
2,2	1	1	50	10	non

En Figure IV.28, nous cartographions les 30 trajectoires alternatives construites par un des quatre agents renard pendant 24 h ainsi que les localisations enregistrées sur un renard suivi par l'Anses pendant une journée. Les données de description de l'espace sont également affichées : bâtiments, routes et chemins, zones arborées, hydrographie. Les trajectoires sont calculées en tenant compte de ses éléments du paysage : l'agent y choisit ses destinations, zone arborée ou bâtiment selon son activité, et il contourne ou est freiné par les obstacles.

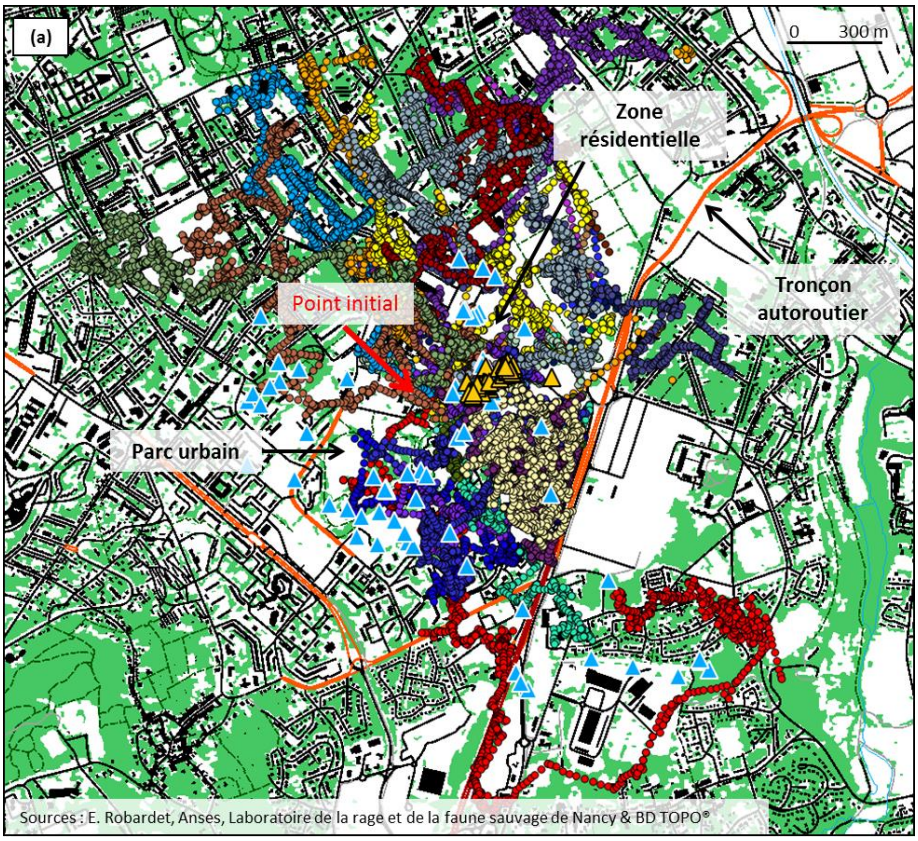


Figure IV.28. a) Simulation de trajectoires construites par un agent renard pendant 24 heures à partir d'une localisation enregistrée à Nancy : les 30 trajectoires alternatives construites avec les mêmes paramètres et l'ensemble des localisations enregistrées sur un renard pendant 24 heures (une couleur des localisations différente par trajectoire simulée).

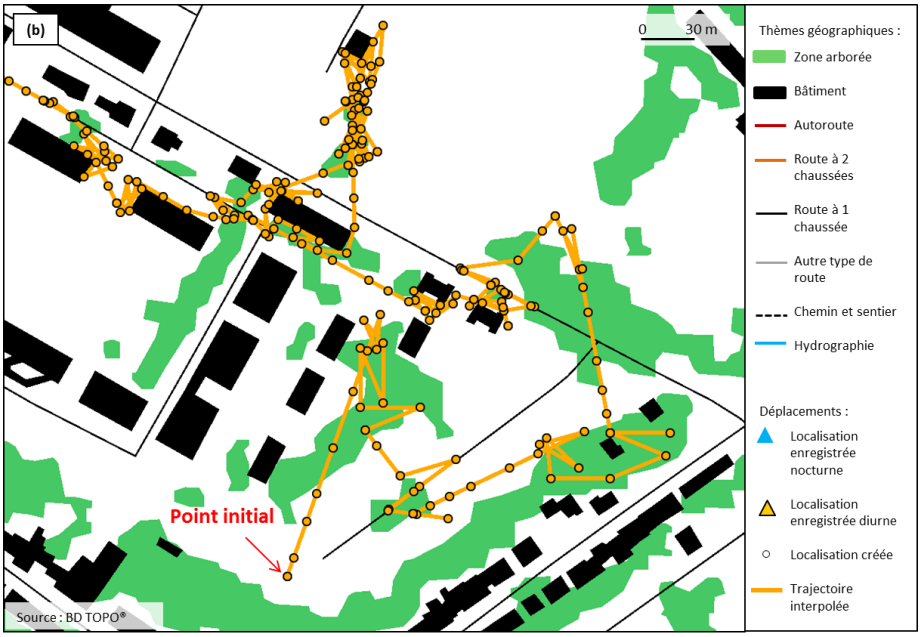


Figure IV.28. b) Extrait d'une trajectoire sur les 4 premières heures de simulation.

Nous effectuons l'analyse de ces trajectoires selon une approche qualitative et quantitative. Dans la mise en œuvre des modèles de simulation, une partie des observations est utilisée pour construire le modèle, et une seconde partie des observations est exploitée pour évaluer les résultats issus du modèle. Dans notre démarche, les localisations enregistrées lors des déplacements sont en quantité restreinte, ce qui laisse peu d'observations pour séparer les deux étapes de construction et de validation de notre modèle. À partir des observations et de la littérature, nous avons extrait des comportements par espèce et par type de milieu parcouru. Toutefois, nous utilisons aussi certaines des observations afin de les comparer avec les résultats de simulation. Cela nous permet de vérifier si les trajectoires construites sont cohérentes et réalistes, et d'identifier dans quelle mesure améliorer les algorithmes implémentés. Nous comparons les résultats de simulation et les observations selon les deux approches, qualitative et quantitative, puis à l'aide de calcul sur la forme des trajectoires.

- (a) Comparaisons qualitatives et quantitatives des trajectoires simulées avec celles observées

L'interprétation visuelle des trajectoires construites permet de formuler des remarques générales. Par rapport aux localisations enregistrées qui ont une fréquence moyenne de 5 minutes, le nombre de points créés est au moins 5 fois plus grand avec une fréquence de 1 minute (pas de temps qui permet de prendre en compte les données géographiques à grande échelle comme par exemple lors des contournements d'obstacles). Les trajectoires simulées interpolées sont donc plus précises temporellement et spatialement car le nombre de points créés est plus élevé que les observations pendant 24 h. Nous avons indiqué en Tableau IV.4 des mesures pour comparer simulations et observations, pour chaque renard suivi dont nous avons utilisé un des points GPS comme localisation initiale des 4 agents créés. La distance totale est en moyenne inférieure, environ de moitié, pour les trajectoires construites (9 km pour les 3 renards suivis pendant 24 h) que pour les trajectoires interpolées à partir d'observations (21 km). Les valeurs des trajectoires alternatives pour un agent sont assez dispersées (écarts-types entre 4,8 km et 8,2 km). Le modèle de simulation peut aboutir à des déplacements sur des distances équivalentes aux observations ou bien sur des distances beaucoup plus grandes. Cela peut être

dû au fait que le rythme de déplacements entre phases de repos et de recherche de ressources n'est intégré que par le type d'élément du paysage d'intérêt sélectionné comme destination. Cela peut avoir pour conséquence d'augmenter les trajets. De plus, nous n'avons pas attaché d'informations sur les gîtes de repos qui constituent pour les renards suivis un lieu de départ et de retour. Les déplacements observés forment souvent une boucle pendant 24 heures dont l'emplacement de départ et celui d'arrivée sont situés au niveau des gîtes de repos. Dans les simulations, l'agent explore son espace sans point de retour défini. L'emprise de l'environnement agent intègre la notion d'espace parcouru maximal, cependant il semble que cela ne suffit pas à restreindre les déplacements des agents.

Tableau IV.4. Comparaison entre trajectoires interpolées à partir des enregistrements et à partir des localisations simulées sur les 4 renards dans l'agglomération de Nancy.

Individu associé à un espace parcouru	Observation			Simulation			
	Durée du suivi (heure)	Nombre de points	Distance totale (m)	Durée du suivi (heure)		Nombre de points	Distance totale (m)
renard 1	12, la nuit	39	6808,6	24	*moyenne*	1442	17750,0
					écart-type	3,1	8158,9
renard 2	24	90	7637,0	24	*moyenne*	1445	23867,6
					écart-type	4,1	4812,7
renard 3	24	153	8247,2	24	*moyenne*	1443	19457,8
					écart-type	3,7	7670,4
renard 4	24	193	11364,2	24	*moyenne*	1444	22867,6
					écart-type	3,6	4864,9

Dans le cas illustré en Figure IV.28.a par exemple, nous constatons que les espaces parcourus par l'agent pour chaque trajectoire sont plus importants que l'espace parcouru par le renard suivi (renard 4 dans le Tableau IV.4). À partir d'une même localisation initiale, les trajectoires construites s'étendent dans des endroits non parcourus par le renard, notamment au nord de la zone. Le renard traverse deux fois le tronçon autoroutier (autoroute en rouge et route à 2 chaussées en orange, en diagonale au sud-est). Sur les 30 trajectoires, 4 sont réparties des deux côtés de ce tronçon et 2 autres ont des localisations entre les chaussées séparées. L'autoroute semble donc marquer pour l'agent une séparation du site d'étude parcouru, avec moins de 3 % des localisations situées de l'autre côté de l'autoroute que le point initial. Dans ce cas, la comparaison des résultats de simulation avec les observations montre que le modèle semble surestimer le rôle d'obstacle au déplacement des tronçons autoroutiers. Les lieux parcourus semblent par contre cohérents : dans les zones arborées du parc urbain au centre de la carte et dans les jardins de la zone résidentielle.

Les simulations lancées sur les espaces parcourus par les trois autres renards donnent également des traces qui passent par des endroits non utilisés lors des observations. Sur la Figure IV.29, deux trajectoires simulées sont cartographiées (renard 3 dans le Tableau IV.4). Ces trajectoires ont été construites par un agent avec le même paramétrage qu'en Figure IV.28 mais avec un point initial différent. Ce point initial se situe à proximité d'un bois périurbain (au centre de la carte), d'un campus universitaire (à l'est) et de zones résidentielles (à l'ouest et au nord). Les localisations enregistrées sont situées au nord du bois périurbain en période diurne et au nord au-delà de la zone cartographiée pendant la nuit. La trajectoire observée interpolée mesure environ 8 km. La trajectoire (1) simulée correspond à une distance de 6 km. L'agent explore, dans cette alternative, une zone avec plusieurs larges bâtiments qui sont des établissements d'enseignement secondaire et tertiaire. L'agent a reconnu les obstacles au déplacement que

sont les bâtiments et les contournent. Il a également identifié ces bâtiments comme des éléments d'intérêt, de la même manière que les petites zones arborées à proximité et que le bois périurbain : respectivement il reste à proximité et les parcourt. La trajectoire (2) mesure 26 km. Elle traverse le bois périurbain qui correspond à une grande zone arborée dans les données et qui est identifié comme élément d'intérêt. La trajectoire présente des lignes droites car l'agent rencontre peu d'obstacles et que certaines destinations choisies se situent loin de sa localisation du moment.

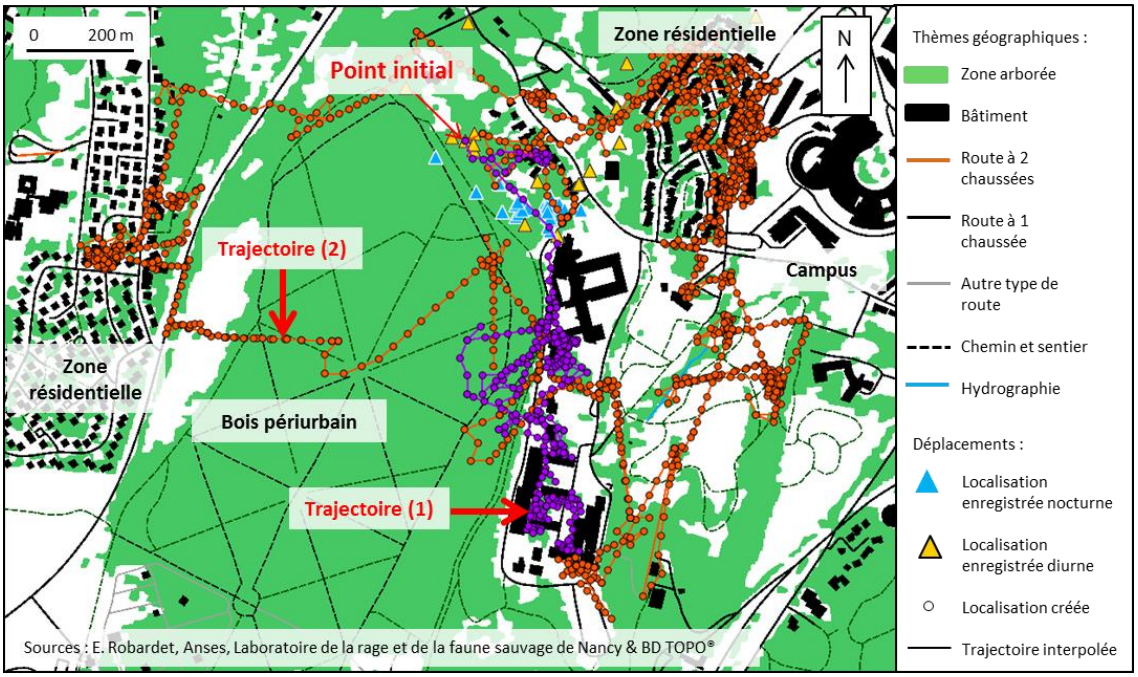


Figure IV.29. Deux trajectoires alternatives construites par un agent pendant 24 h, sur le site d'étude de Nancy correspondant au renard 3. Les localisations enregistrées qui sont visualisées sur la carte correspondent à la période diurne, celles en période nocturne sont situées au nord au-delà de l'emprise de la carte.

Les résultats de simulation sont cohérents avec les observations dans le cas de la Figure IV.29. Les lieux fréquentés sont le bois périurbain et ses alentours, même si ils le sont davantage dans les simulations. Nous remarquons que dans les espaces peu contraints, les trajectoires semblent peu réalistes car elles sont rectilignes. Nous n'avons pas introduit dans le modèle un déplacement aléatoire de l'agent lorsqu'il se dirige vers la destination sélectionnée et qu'il n'y a pas d'obstacles.

L'espace parcouru par le renard 2, dans le Tableau IV.4, se situe à la frontière d'une commune et d'un milieu agricole-boisé. Les trajectoires construites sont elles-mêmes situées entre cette commune et les zones arborées entourées par des cultures (non présentes dans les données de description de l'espace). La durée passée dans le milieu urbanisé et le milieu agricole-boisé diffère des observations dans le sens où, pendant 24 heures, les agents dans les simulations passent proportionnellement plus de temps à proximité des zones urbaines que des zones arborées.

Le cas du renard 1 (Tableau IV.4) est un peu différent car les observations ne couvrent que 12 heures en période nocturne. Nous ne pouvons cependant multiplier par deux la distance parcourue par le renard car celui-ci se déplace moins pendant la période diurne. Toutefois si l'on divise la moyenne des distances simulées par deux, cela revient à environ 9 km parcourus, plus élevés que les 7 km déduits des observations. Une autre remarque concerne la voie ferrée qui est moins traversée par l'agent (1 à 3 fois pour 10 trajectoires alternatives) que par le renard qui fréquente les bords de voies (6 traversées). L'agent traverse par contre une fois le tronçon

autoroutier dans 27 trajectoires sur 30, comme le fait le renard, à la différence que le renard retraverse le tronçon et que l'agent non.

Les différences entre les trajectoires simulées et observées sont les suivantes.
- Le modèle de simulation semble surestimer le rôle d'obstacle des tronçons autoroutiers associés à une probabilité de traversée de 0,1. Les traversées sont toutefois réalisées par l'agent mais elles sont souvent uniques. Le rôle d'obstacle des voies ferrées semble aussi surestimé par le modèle. Nous avons attribué la probabilité de traversée à 0,1 à cause des bas-côtés ou de la présence potentielle de grillages qui peuvent freiner les déplacements. Cependant, cette valeur de probabilité paraît trop élevée.
- Les lieux parcourus par les agents semblent cohérents avec les observations. Il est difficile de comparer localement les déplacements des renards et ceux des agents car les intervalles de temps entre les localisations ne sont pas les mêmes. Le comportement exact d'un renard traversant une route ou longeant un bâtiment n'est pas connu précisément. Les types de zones parcourues semblent par contre cohérents : lieu où il y a des zones arborées (bois ou parcs urbains) et des bâtiments à proximité (zones résidentielles avec jardins).
- L'espace parcouru par les agents est plus étendu que par les renards suivis. Les distances sont surestimées dans le modèle. Cela est certainement dû en grande partie à une vitesse de déplacement trop élevée dans le modèle et à une prise en compte des rythmes de déplacements pas assez réaliste.

- (b) La forme des trajectoires et les relations entre trajectoires et élément du paysage

Nous utilisons des indices de description des trajectoires : sur les localisations les composant et sur les trajectoires interpolées (appelées aussi traces linéaires). Pour quantifier les différences entre observations et simulations, nous nous intéressons en particulier à la forme des trajectoires et aux éléments du paysage fréquentés. Nous comparons ainsi les relations entre trajectoires et espace, puis la forme des trajectoires. Nous prenons le cas du renard 4 dans le Tableau IV.4.

- Les relations entre trajectoires et espace.

Les indices sur ces relations sont calculés pour la trajectoire observée par renard et pour l'ensemble des 30 trajectoires construites (moyenne et écart-type pour les trajectoires alternatives). Ceux-ci concernent, comme indiqué dans le Tableau IV.5 :

- les éléments du paysage parcourus : pourcentage des localisations observées et de celles créées, situées à l'intérieur des zones arborées, et nombre de zones arborées parcourues ;
- les éléments du paysage croisés par les trajectoires : nombre de cours d'eau différents traversés, puis nombre de traversées des routes et nombre de routes différentes traversées. La distinction permet d'évaluer si l'agent ou l'animal a tendance à traverser les mêmes routes ;
- la répartition des localisations par rapport aux valeurs de pentes ;
- les distances minimales moyennes entre les localisations des trajectoires et les éléments du paysage : bâtiments, routes de différents types et chemins. Le principe est montré en Figure IV.30.

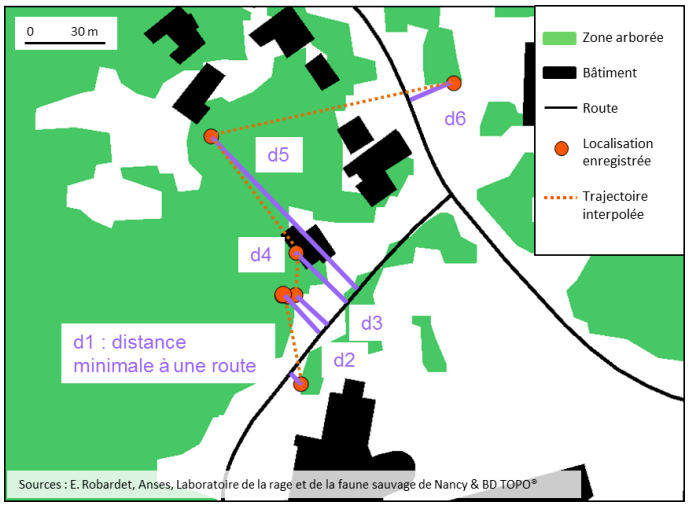


Figure IV.30. Principe du calcul de la distance minimale moyenne entre les localisations d'une trajectoire et les éléments du paysage : exemple pour les routes. La valeur de la distance moyenne minimale pour cette trajectoire composée de 6 localisations est la moyenne des distances de d1 à d6.

Nous avons calculé les distances moyennes minimales aux bâtiments et aux routes car ce sont deux types d'éléments du paysage faisant obstacle aux déplacements et qui ont aussi une autre influence potentielle auprès des animaux. Pour les routes, nous avions identifié que les renards semblaient s'en tenir éloignés, notamment pour celles avec un trafic important (autoroute, route à 2 chaussées). Les bâtiments sont des obstacles mais représentent aussi un intérêt par la présence de ressources. Cette multiplicité des rôles des éléments du paysage sur les animaux n'est pas évidente à modéliser. L'indice de distance minimale permet d'évaluer si nous avons bien pris en compte ces influences à travers la méthode de sélection des destinations et le contournement des obstacles aux déplacements par l'agent.

De manière générale, le différentiel entre les valeurs correspondant aux observations et aux simulations dans le Tableau IV.5 est moins important que pour les distances dans le Tableau IV.4. Cela peut être dû au fait que les valeurs moyennes calculées à partir des localisations amoindrissent les écarts entre la modélisation et la réalité par rapport à la prise en compte de l'ensemble des trajectoires interpolées.
Concernant le parcours hors des zones arborées, la répartition des localisations en pourcentage est équivalente pour les observations et pour les simulations : 60 % et 62 %. Le nombre de zones arborées est par contre plus élevé pour les simulations, de 47 alors qu'elles sont de 17 pour les observations. Cela est certainement lié à la méthode de sélection des destinations. Nous avons admis que la sélection d'une même destination pendant la durée de simulation d'une journée n'est pas possible, sauf si aucune autre destination n'est réalisable à l'intérieur du rayon de perception. L'agent cherche donc en priorité des destinations parmi les bâtiments et les zones arborées qu'il n'a pas déjà atteintes, ce qui peut augmenter le nombre de zones arborées différentes superposées par les localisations construites. Les distances des trajectoires simulées sont plus grandes que la distance observée, ce qui amène l'agent à parcourir plus de zones arborées.
Les nombres de traversées (intersection de la trajectoire linéaire) avec des routes, goudronnées ou non, sont aussi équivalents, mais plus de routes différentes sont traversées dans les observations. Notre modèle fait qu'un agent traverse plusieurs fois la même route, alors que dans les observations, le renard traverse plus de routes différentes.

Tableau IV.5. Les relations entre localisations et éléments du paysage : comparaison entre les enregistrements sur un renard (4) et les localisations des 30 trajectoires alternatives construites par un agent.

	Type des localisations	Enregistrements	Moyenne des 30 trajectoires simulées	Écart-type des 30 trajectoires simulées
	% de points en dehors des zones arborées	60,1	62,2	8,5
	nombre de zones arborées parcourues	17	47,0	14,7
	nombre d'intersections avec une route	113	126,0	43,1
	nombre de routes croisées	83	37,6	16,1
	nombre de cours d'eau traversés	0	0	0
% de localisations	pentes [0;5[	96,37	98,7	3,7
	pentes [5;10[	3,63	1,2	3,5
	pentes [10;100[	0	0,1	0,3
	moyenne des valeurs de pente	3,17	2,7	0,3
Distance moyenne aux éléments du paysage (m)	bâtiments	24,0	18,6	15,3
	chemins	514,7	526,2	256,8
	routes à 1 chaussée	35,1	27,9	20,0
	routes à 2 chaussées	264,3	279,2	147,6
	autres routes	658,5	702,0	196,6
	sentiers	224,8	219,7	60,0
	autoroutes	696,2	891,5	479,7
	routes d'importance grande	499,7	600,7	364,6
	routes de moyenne importance	272,2	204,6	94,5
	routes d'importance moyenne faible	116,5	100,8	37,4
	route de faible importance	37,0	35,4	23,6

Les distances minimales moyennes entre les localisations et les routes restent dans le même ordre de grandeur entre observations et simulations, quel que soit le type de route et l'importance du trafic. Elles sont un peu plus importantes dans les observations, sauf pour les types suivants : route à 1 chaussée et sentiers, qui sont les deux types les plus présents sur le site d'étude. Les différences sont faibles pour pouvoir identifier clairement les causes, mais elles sont peut-être dues en partie au comportement de contournement des obstacles modélisés. Un agent qui arrive à une route la longe jusqu'à la traverser ou à modifier sa destination. La distance moyenne aux bâtiments est similaire, dans cet exemple un peu plus petite pour les simulations. Le bâti représente des éléments d'intérêt et donc des destinations potentielles, ce qui fait que l'agent peut rester à proximité d'un bâtiment lors de la phase d'exploitation.
Les répartitions des localisations dans les intervalles de valeurs de pentes sont similaires, avec une moyenne légèrement plus élevée pour les observations. L'agent se déplace un peu plus au nord du site que le renard suivi, là où les pentes sont très faibles, ce qui peut expliquer ce léger écart. La pertinence des indices et notamment des distances minimales moyennes aux éléments du paysage est valable si la comparaison s'effectue sur un même site. En effet, cela garantit une occupation du sol semblable et donc un rapport aux éléments du paysage de l'animal et de l'agent comparable. Les valeurs des indices n'ont pas la même signification selon le type de site d'étude. Pour le site du renard 4, le bâti est dense. L'espace est fortement contraint et la distance minimale moyenne est liée à l'occupation de l'espace par les bâtiments. En Figure IV.31, nous avons représenté l'éloignement aux bâtiments.

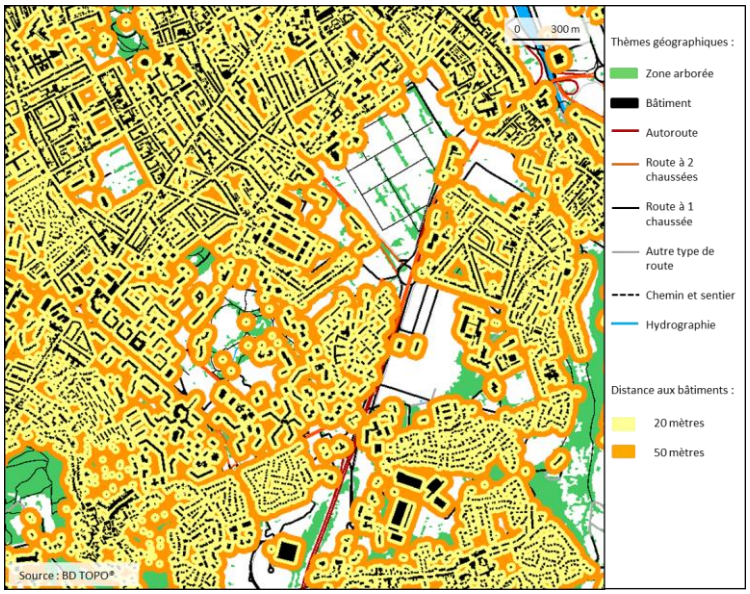


Figure IV.31. Les distances aux bâtiments du site d'étude du renard 4 suivi à Nancy.

Cette cartographie montre que l'espace situé à une distance de moins de 20 m du bâti est important : 58 % du site cartographié ; 78 % de l'espace est à moins de 50 m du bâti. Cette configuration a aussi une influence sur les distances minimales au bâti : de 24 m pour les observations, et de 18 m pour les simulations. Sur le site, la densité des bâtiments est plus importante au nord et les zones arborées y sont plus fragmentées, ce qui correspond à plus de possibilités de destination. Cela peut expliquer que les trajectoires simulées se situent davantage au nord du site (Figure IV.28) que pour les observations et que la distance au bâti soit un peu plus faible dans les simulations.

Pour les deux autres renards en milieu urbain dense (renard 1 et renard 3), la comparaison entre observations et simulations aboutit à des remarques semblables : le nombre de zones arborées est plus important dans les simulations, alors que le nombre de routes différentes traversées est moindre. Les distances minimales moyennes aux routes à 1 chaussée sont moins grandes dans les simulations. Pour le renard sur le site d'étude avec peu de routes et de bâti (renard 2), les distances minimales moyennes sont aussi moins grandes dans les simulations, pour les routes (simulation : 24 m, observation : 37 m) et les bâtis de manière plus marquée (simulation : 85 m, observation : 479 m). Dans ce cas, le modèle surestime l'attraction du centre-ville de la commune située au nord de ce site, attraction modélisée par les bâtiments choisis comme destination. L'agent a potentiellement plus d'endroits disponibles loin du bâti et des routes sur ce site, mais il les exploite peu. Ce différentiel amène à prendre en compte dans le modèle le type d'espace dans lequel l'agent se déplace. Cela pourrait consister à adapter les algorithmes de sélection des destinations et de déplacement en fonction d'une caractérisation préalable du site d'étude.

Les résultats de simulation pour le renard, résumés en Tableau IV.5, présentent des relations entre localisations et espace cohérentes avec les enregistrements. Les différences sont :
- de manière générale, un évitement plus marqué pour les routes dans le comportement agent. On a surestimé la peur des routes (cela pourrait se traduire aussi par une audace plus importante dans le modèle). Pour les routes à 1 chaussée et les sentiers, les distances sont un peu plus petites, peut-être parce que l'agent les longe avant de les traverser ou de changer de direction ;

- le nombre plus important de zones arborées parcourues dans les simulations. Le modèle surestime les distances ainsi que la superficie de l'espace parcouru car l'agent privilégie des destinations de zones arborées différentes à chaque fois. La sélection des destinations est aussi privilégiée dans les endroits où il y a plus d'éléments d'intérêt. Pour les renards, cela concerne les zones bâties avec de petites zones arborées, même si la méthode de sélection des destinations favorise les grandes superficies des zones arborées. Les renards parcourent en fait les zones arborées à l'intérieur et en dehors des zones urbaines, mais avec une alternance (notamment jour/nuit) que notre modèle ne représente pas ;
- la position des animaux par rapport aux éléments du paysage est liée au type d'espace. Le nombre de traversées de routes et les distances minimales moyennes dépendent des types d'occupation du sol et de leur configuration. Un site d'étude densément construit possède peu d'espaces non construits sur lesquels les animaux peuvent se déplacer. Le modèle surestime la proximité au bâti et aux routes, et ceci encore plus dans le site où il y a peu de bâtiments et de routes.

- Les indices de description des trajectoires.

Ces indices n'intègrent pas les éléments du paysage. Il s'agit des distributions des distances et des angles relatifs entre les localisations. La comparaison des distributions permet de se rendre compte des différences entre les formes de trajectoires observées et celles construites, et de faire le lien entre les algorithmes implémentés et leur traduction dans les déplacements simulés. La Figure IV.32 réunit les fréquences de distances et d'angles relatifs pour un renard (renard 4). Le pas de temps de la simulation est de 1 min. Afin de comparer avec les observations dont l'intervalle de temps entre deux localisations est en moyenne de 5 min, nous n'avons considéré qu'une localisation sur cinq dans les simulations.

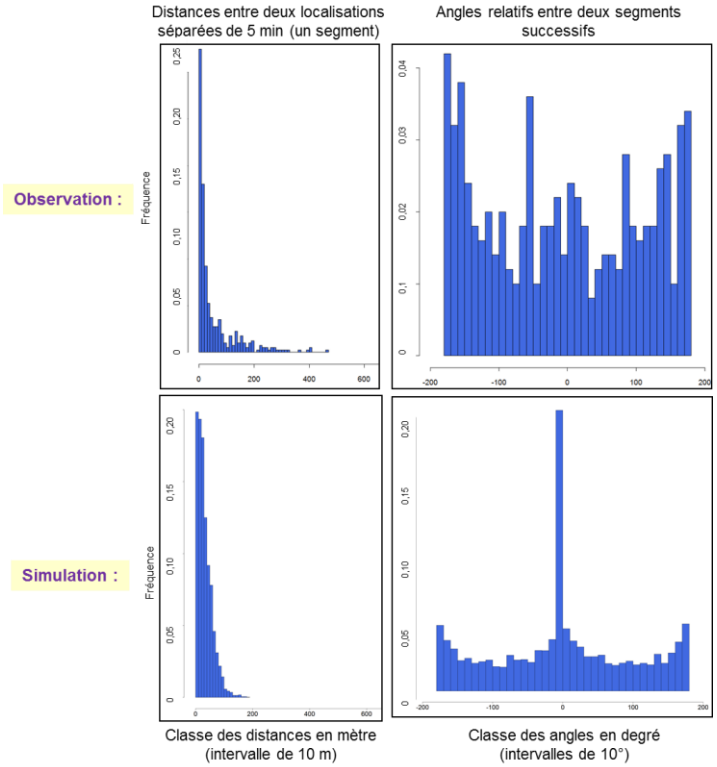


Figure IV.32. Comparaison des distributions des distances et celles d'angles relatifs entre les observations sur un renard et les résultats de 30 simulations par un agent sur le même site d'étude en milieu urbanisé, sur des intervalles de temps de 5 minutes.

Sur le cas illustré en Figure IV.32, les deux histogrammes des distances – estimées à partir des observations et simulées – se ressemblent davantage que les deux histogrammes des angles relatifs. Les distances parcourues pendant 5 minutes sont comprises entre 0 et 450 m alors que celles des simulations le sont entre 0 et 190 m correspondant à la vitesse moyenne fixée de 2,2 km/h. Les distances observées sont regroupées à proximité des faibles valeurs, 80 % d'entre elles sont en-dessous de 50 m. Les trois quarts des distances simulées sont inférieures à 50 m, et 10 % sont nulles ce qui est dû à des recherches infructueuses de chemins avec une destination et à une attente associée avant que l'agent modifie sa destination. Il n'y a pas de grandes distances parcourues lors des simulations (supérieures à 200 m), ce qui confirme que le modèle sous-estime la vitesse de déplacement en ne prenant pas bien en compte les rythmes d'activités.
Les angles relatifs des trajectoires observées ne montrent pas de tendance marquée, seulement un regroupement proche des valeurs extrêmes 180° et nulles : 25 % entre 160° et 180° en valeurs absolues et 15 % entre -20° et 20°. Ces regroupements se traduisent par 3 pics de fréquences similaires sur l'histogramme. Ce sont des regroupements que l'on retrouve également dans des simulations mais dans une autre proportion : 20 % dans l'intervalle de valeurs absolues 160° à 180°, et 35 % dans l'intervalle -20° à 20°, dont 15 % non nuls. Les angles faibles sont associés à des lignes quasi droites et à des stations au même endroit. Ceux élevés signifient des changements de direction proches du demi-tour qui peuvent intervenir après une nouvelle définition de la destination à atteindre ou de la rencontre avec un obstacle. Les valeurs nulles ne correspondent pas forcément à la même interprétation dans les simulations et les observations. Le renard reste statique généralement lorsqu'il est dans un gîte diurne ou lors de pauses, par exemple pour consommer de la nourriture ou se cacher s'il perçoit une présence. Dans le modèle, un agent peut se retrouver bloquer par un obstacle ce qui entraîne la génération de petites distances avant de modifier sa destination. En dehors des valeurs nulles des angles, la répartition dans les classes de valeurs est plus régulière pour les simulations avec un écart-type de 1,5 sans les valeurs nulles, alors que pour les observations il est de 2. Ceci peut signifier que le renard a une forme de déplacement un peu plus sinueuse et hétérogène que les trajectoires simulées.
Pour les tests sur les sites des autres renards, on retrouve les caractéristiques décrites dans l'exemple précédent. Les distances simulées sont plus nombreuses que celles observées dans les classes de faibles valeurs. Pour la zone en milieu peu urbanisé (renard 2), moins de bâti et donc moins d'obstacles hermétiques sont présents. Cela entraîne des distances, sur un même intervalle de temps de 5 minutes, plus élevées que pour les simulations sur les autres sites des renards, avec seulement la moitié des distances comprises entre 0 et 50 m. Les angles relatifs associés sont aussi comparativement plus nombreux dans les classes autour de 0°, ce qui signifie qu'il y a moins de changements de direction effectués.

La forme des trajectoires simulées est différente de celles interpolées à partir des observations sur deux aspects principaux.
- Les vitesses de déplacement sont plus variées dans les observations. Il y a de nombreuses très petites valeurs correspondant certainement à des positions statiques des renards en repos, ainsi que des valeurs plus élevées qui indiquent que les renards peuvent se déplacer rapidement lors de phases de recherche de ressources. Dans les simulations, les vitesses sont plus homogènes : le modèle restreint en fait les vitesses en-dessous de la vitesse moyenne observée. Le réalisme des vitesses pourraient être amélioré en élargissant la plage des valeurs possibles, et en prenant en compte la distinction entre période nocturne et diurne dans les vitesses et non uniquement dans la sélection des types de destination.

- La forme des trajectoires simulées semble cohérente avec la réalité lorsque l'espace est fortement contraint, c'est-à-dire lorsqu'il y a des obstacles qui dévient la trajectoire, ce qui correspond à des angles relatifs élevés. Les petits angles relatifs correspondent aux endroits où il n'y a pas d'obstacles et aux endroits où l'agent ne trouve pas de direction de déplacement attendant de sélectionner une nouvelle destination. La trajectoire est alors soit rectiligne soit statique, ce qui est peu réaliste dans les deux cas.

3.2. Simulation des trajectoires pour les cervidés en milieu forestier

Nous évaluons les comportements implémentés pour les deux espèces de cervidés – chevreuil et cerf – sur le site de la RNCFS de La Petite Pierre dans les Vosges. Nous avons pu analyser les déplacements observés des deux espèces (chapitre III) et nous évaluons à présent les résultats des simulations. Le cadre des tests est le même que précédemment : pour un paramétrage fixé, un agent appartenant à l'espèce chevreuil ou cerf construit 30 trajectoires alternatives pendant 24 h. Le pas de temps de simulation est de 1 minute, ce qui fait que les trajectoires simulées sont composées d'environ 1440 localisations. Aucune destination fixée ne doit être atteinte au final. Les propriétés de l'agent et les paramètres de simulation sont indiqués dans le Tableau IV.6. Les différences entre les tests sur les deux espèces résident dans la vitesse moyenne de déplacement (350 m/h pour les chevreuils et 450 m/h pour les cerfs) ainsi que dans les préférences en type de peuplements forestiers validées par les analyses statistiques. Selon les résultats présentés en III-2, les cerfs sont un peu moins sélectifs quant à leur présence dans les différents peuplements et ils parcourent davantage les zones de conifères que les chevreuils. Nous avons donc intégré à la méthode de sélection de destination une pondération dans l'intérêt des zones arborées en fonction du peuplement (voir la méthode en IV-2.3.2). Les trois types de peuplements ont un intérêt relativement égal avec une préférence pour les feuillus (pondération de 5), pour les mixtes (4) puis pour les conifères (3). Pour les chevreuils, la préférence pour les feuillus (pondération de 5) puis peuplements mixtes (4) est plus marquée par rapport aux conifères (1). Les autres propriétés sont les mêmes pour les deux espèces. Le rayon de perception est fixé à 50 m. L'agent attend 10 min avant de modifier sa destination s'il ne l'a pas atteinte. Dans ce test, la sélection de destinations différentes est privilégiée. Nous avons choisi de conserver ce paramétrage afin de comparer ces résultats avec ceux sur les renards dans un autre type de milieu. Ce choix entraîne par contre potentiellement des déplacements sur de longues distances. Notre algorithme représente le fait que l'animal parcourt une zone arborée puis choisit une autre destination (la même zone arborée ou une autre). Sur le site des Vosges, le milieu est forestier et les zones arborées sont considérées selon leur type de peuplement. L'environnement agent contient la description de la végétation de la BD TOPO® qui correspond à des zones arborées relativement étendues (jusqu'à 10 km²). Le paramétrage de sélection de destinations différentes permet de favoriser les déplacements en dehors de la zone arborée où se trouve l'agent initialement. Les observations montrent que les chevreuils se déplacent sur un espace plus restreint que les cerfs, ce qui laisse supposer qu'ils explorent moins de destinations et qu'ils y passent potentiellement plus de temps. Cependant, cet aspect est pris en compte par des vitesses moyennes de l'agent différentes selon l'espèce animale. La superficie de l'environnement agent et donc l'espace que l'agent peut parcourir est de 25 km². Cela est plus que les domaines vitaux des chevreuils et des cerfs mais limite les déplacements à des distances réalisables de quelques dizaines de kilomètres par jour.
Les obstacles aux déplacements sont les routes et les cours d'eau auxquels nous avons attribués la même importance pour les deux espèces. Les sentiers et les chemins ont une probabilité de franchissement de 1, ce qui signifie qu'ils ne représentent pas un obstacle, les routes non

goudronnées ont une probabilité de 0,5 et celles à une chaussée de 0,3. Ces probabilités correspondent à une estimation à partir des observations. Les sentiers et chemins ont un couvert arboré important, ce qui les distingue peu du reste de la forêt. Les routes goudronnées ou non sont plus larges que les chemins et sont probablement davantage empruntées par des randonneurs ou des véhicules de services. Elles sont donc associées à plus de dérangement et à un faible couvert arboré. Il n'y a pas de voies ferrées sur le site. Pour l'hydrographie, nous avons fixé la probabilité de traversée pour les cours d'eau permanents à 0,1, ce qui est bas, mais les observations montrent peu de traversées pour les deux espèces. Nous avons vu que les pentes fortes correspondent à une présence faible des chevreuils et des cerfs : les agents prennent en compte la somme des pentes en valeur absolue entre sa localisation actuelle et celle qu'il construit. Nous avons fixé un seuil maximal pour la somme des pentes à 150°, au-dessus duquel un autre chemin est emprunté. Dans ce test, nous n'avons pas modifié ni la persévérance ni l'audace.

Tableau IV.6. Paramètres de construction des trajectoires pour les chevreuils et les cerfs sur le site d'étude de La Petite Pierre.

Espèce	Type de déplacement	Algorithme de déplacement	Pas de temps réel (s)	Vitesse maximale (km/h)	Audace	Rayon de perception (m)	Angle de perception lors du déplacement	Durée maximale avant un changement de destination (min)	Sélection possible d'une même destination
chevreuil	exploratoire	projetés de rayon	60	0,35	0,5	50	270	10	non
cerf				0,45					

	Probabilité de traversée des obstacles					Somme maximale des pentes	Préférence des destinations en %		
Espèce	Chemin et sentier	Route à une chaussée	Route non goudronnée	Cours d'eau permanent	Cours d'eau intermittent	Pentes en degré jusqu'au point suivant	Forêt fermée de feuillus	Forêt fermée de conifères	Forêt fermée mixte
chevreuil	1	0,3	0,5	0,1	0,8	150	50	10	40
cerf							40	25	35

Comme pour les renards, le rythme de déplacements pour les deux espèces n'est pas pris en compte explicitement à travers le type de destinations. Il est traduit par la durée pendant laquelle l'agent exploite et parcourt une destination atteinte (10 min). Le rythme de déplacements était peu explicite par l'analyse des observations (partie III-1) mais il semblait que les deux espèces alternaient régulièrement des phases assez statiques avec des phases de déplacements plus intenses. Nous n'avons pas cherché à respecter précisément la durée des phases de pause (repos, alimentation) et celles de déplacement, l'objectif étant de visualiser les chemins empruntés. Nous avons quand même conservé l'idée de l'alternance des phases.
Nous lançons les tests pour les chevreuils puis pour les cerfs. La localisation initiale de l'agent est une des localisations enregistrées afin de mieux se rendre compte des différences entre simulations et observations. Nous analysons les résultats en nous appuyant sur la situation de l'agent par rapport aux éléments du paysage et sur sa présence dans les types de peuplements forestiers et sur des terrains plus ou moins pentus. Nous calculons par exemple le pourcentage des localisations situées dans les peuplements de feuillus. Plus le pourcentage est élevé, plus l'animal passe du temps dans les forêts de feuillus.

Simulation de déplacements des chevreuils

Une trajectoire observée et 3 trajectoires simulées sont cartographiées, en Figure IV.33 pour les chevreuils. Les trajectoires sont représentées par leurs localisations successives et par leur interpolation linéaire.

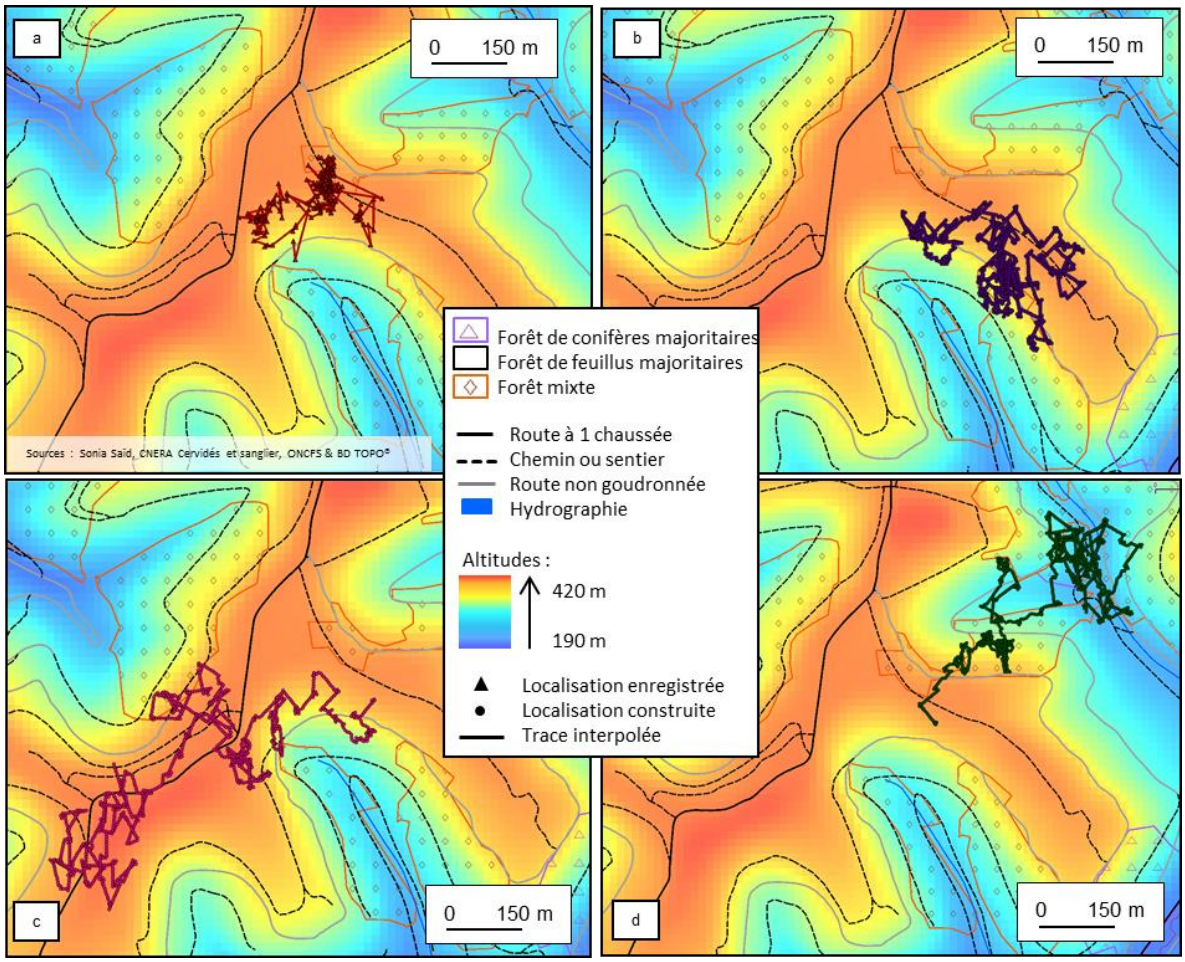


Figure IV.33. Comparaison entre les localisations enregistrées pour un chevreuil pendant 24 h (a), et des trajectoires construites par le processus agent pour la même espèce et la même durée (b, c et d).

Les déplacements simulés en Figure IV.33.b, c et d correspondent à des distances légèrement plus grandes que pour les observations en Figure IV.33.a : autour de 10,5 km et de 8 km pour les enregistrements d'un chevreuil pendant 24 h. La différence réside surtout dans l'espace parcouru : sa superficie est de 15 ha alors qu'elle est égale entre 15 et 40 ha pour les simulations.

Compte-tenu du site d'étude, tous les points sont situés en milieu forestier. La répartition de l'ensemble des localisations observées pour le chevreuil sur plusieurs jours est de 80 % en forêt fermée de feuillus et de 20 % en forêt fermée mixte. Les trois exemples de trajectoires illustrées en Figure IV.33 correspondent à des résultats de simulation variés quant à leur répartition par rapport à l'occupation du sol. Pour les observations en Figure IV.33.a, plus de 95 % des points sont dans des peuplements de feuillus. En Figure IV.33.b, la répartition par rapport aux essences forestières est similaire. En Figure IV.33.c, le parcours d'une zone de conifères est réalisé, ce qui représente 20 % des localisations simulées. La moitié est en forêt mixte. En moyenne, les trajectoires simulées montrent une sélection moindre parmi les peuplements forestiers, ce qui

indique que le modèle avec le paramétrage défini ne prend pas assez en compte la préférence des chevreuils pour les peuplements de feuillus et mixtes.
Pour l'ensemble des localisations du chevreuil, la répartition par rapport aux pentes est de 55 % des localisations en-dessous de 10 degrés et de 40 % entre 10 et 20 degrés. Pour les localisations observées sur la figure, la moitié se situe sur des pentes entre 5 et 15 degrés. En Figure IV.33.b, les pentes les plus parcourues se situent pour la moitié entre 10 et 20 degrés. En Figure IV.33.c, 30 % des localisations sont sur des pentes de moins de 10 degrés et un fond de vallée. La sélection pour les pentes faibles dans les simulations est donc moins importante que dans les observations. La moyenne des pentes pour les trois exemples de simulation est supérieure aux observations : 16 degrés au lieu de 10 degrés. Cela est associé à une variation plus importante des altitudes parcourues dans les simulations que pendant la journée d'observation : les écart-types des altitudes sont respectivement de 25 m en moyenne et de 10 m. Cela signifie que le rôle des pentes est sous-estimé par rapport aux comportements des chevreuils.

Concernant les autres obstacles potentiels aux déplacements, le nombre de traversées des voies de communication (sentiers, chemins, routes forestières) est de 22, toujours pour le chevreuil suivi en Figure IV.33.a, alors qu'il est de 80 en moyenne pour les 30 trajectoires simulées. Il s'agit toutefois des mêmes voies qui sont traversées plusieurs fois (3 voies pour le chevreuil et 8 voies en moyenne pour l'agent). La moyenne des distances minimales entre les localisations et les voies est calculée. Cet indice reste général et dépend beaucoup du milieu concerné. Il peut cependant servir de comparaison sur un même site : 42 m pour la journée d'observation, et 81 m pour les 30 simulations. Le nombre de cours d'eau traversés par le chevreuil est nul, alors que l'agent en traverse en moyenne 1 par jour, par exemple en Figure IV.33.d. L'appréhension des voies de communication par l'agent est illustrée en Figure IV.34.a. Le chemin (en pointillé) est traversé sans contournement car il ne représente pas un obstacle vers une destination déterminée. La route non goudronnée (en gris) qui est associée à une probabilité de traversée de 0,5 entraîne un changement de direction par l'agent pendant 15 minutes avant sa traversée. La Figure IV.34.b illustre le parcours des pentes lors de la simulation. L'agent arrive par la droite de la carte en parcourant une zone de feuillus en altitude élevée (400 m) et en pente faible. Il se dirige vers sa nouvelle destination : une zone de peuplement mixte avec des altitudes plus basses (300 m) et des pentes plus fortes, située à gauche de la carte. Il longe d'abord le bord d'une rupture de pente importante correspondant à des valeurs inférieures à 15 degrés. Puis il emprunte succinctement des pentes fortes autour de 30 degrés afin d'atteindre sa destination.

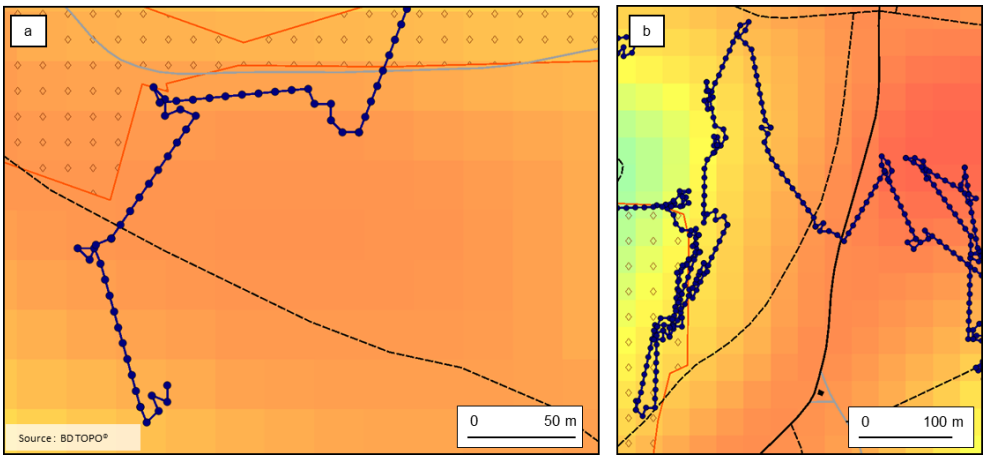


Figure IV.34. Extrait de déplacements simulés par un agent de l'espèce chevreuil : a) pendant 1 heure et b) pendant 4 heures. La légende cartographique est celle de la Figure IV.33.

La répartition des trajectoires simulées par rapport aux éléments du paysage présente des variations avec les observations. De plus, leur forme diffère un peu : les déplacements d'un chevreuil se regroupent davantage dans une surface restreinte (exemple en Figure IV.33.a). Il faudrait alors prévoir une exploitation par l'agent des destinations de zones arborées pendant une durée supérieure à 10 min. Pour correspondre davantage aux déplacements quotidiens, notre modèle pourrait intégrer une gestion de la durée d'exploitation d'une destination ainsi que de la surface exploitée à l'intérieur de cette destination pouvant être de grande superficie.

Simulation de déplacements des cerfs

En Figure IV.35, nous représentons le déplacement d'une femelle cerf (une biche) pendant 24 heures et 3 trajectoires simulées. La trajectoire observée semble visuellement plus rectiligne que les simulations. Elle se présente avec une alternance de regroupements de localisations sur de petites surfaces, comme des clusters, et de déplacements rapides sur plusieurs dizaines de mètres. Les cerfs effectuent des pauses dans des endroits peu étendus et pendant un temps supérieur à 1 heure, comme illustré plus loin en Figure IV.36.a. La biche se repose et mange lors de ces pauses. Elle minimise la dépense d'énergie dans des déplacements rectilignes et optimise le repos et la reconstitution de ses réserves alimentaires en exploitant les zones de repos pendant le temps nécessaire. Cela n'est pas représenté explicitement dans notre modèle. L'alternance entre phase de déplacements vers une destination et phase d'exploitation de cette destination ne suffit pas à traduire la forme des déplacements observés.

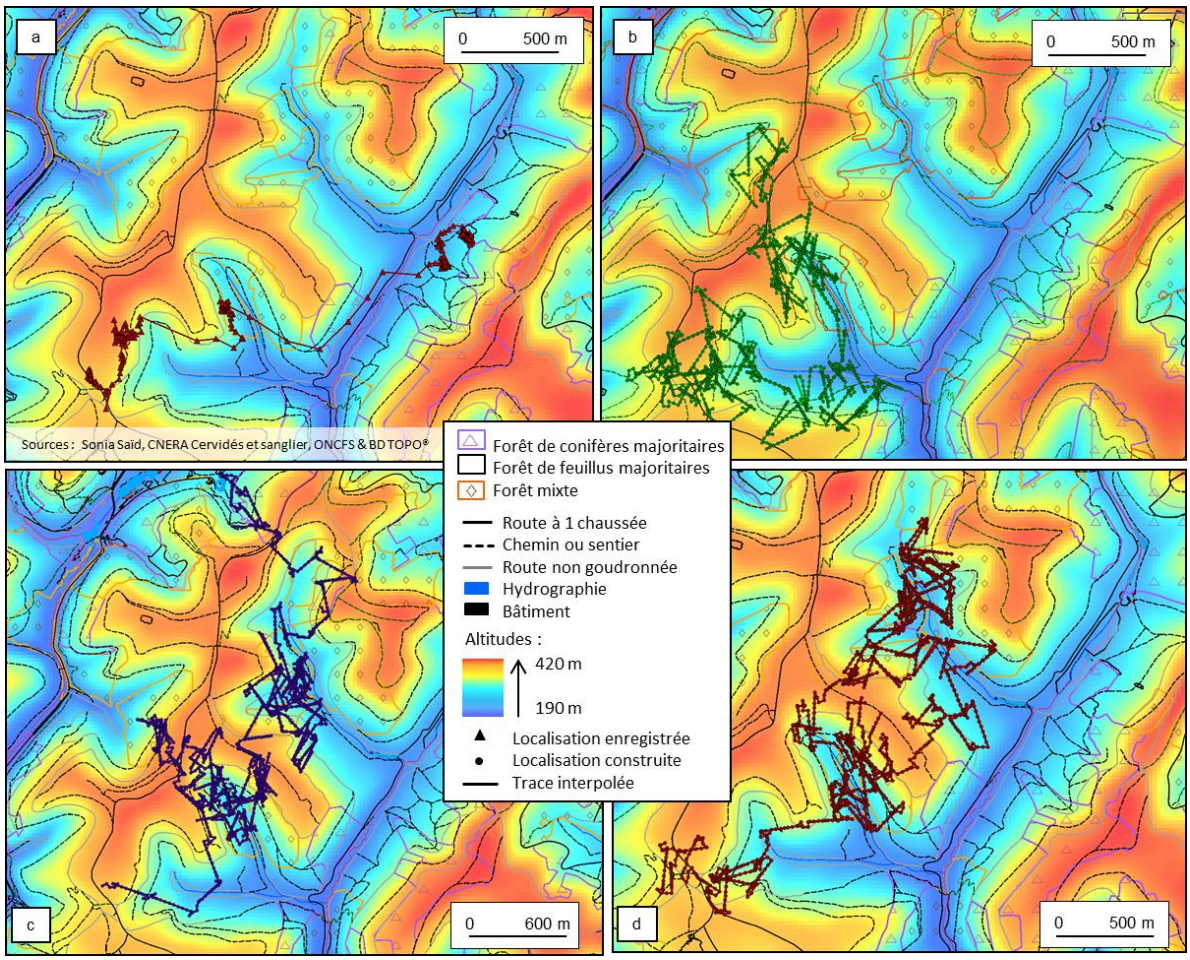


Figure IV.35. Comparaison entre les localisations enregistrées pour un cerf (biche) pendant 24 h (a), et des trajectoires construites par le processus agent pour la même espèce et la même durée (b, c et d).

La distance parcourue par le cerf est de 9 km en une journée, soit un peu plus que par le chevreuil dans l'exemple précédent, ce qui justifie la différence des vitesses moyennes attribuées dans le modèle. Nous nous concentrons dans cette partie sur les trajectoires de la Figure IV.35 qui sont des cas représentatifs parmi les 30 trajectoires simulées. Les résultats de simulation donnent des distances beaucoup plus élevées avec une moyenne de 40 km. La superficie de l'espace parcouru évaluée par enveloppe convexe présente moins d'écart même si celle-ci est égale à 120 ha pour les observations et à 175 ha en moyenne dans les résultats sélectionnés en Figure IV.35.

Sur la Figure IV.35.a, les localisations sont réparties dans les proportions suivantes dans les classes d'essences forestières : 65 % dans les feuillus, 13 % dans la forêt mixte et 2 % dans les conifères. La trajectoire simulée en Figure IV.35.b correspond pour 87 % à des feuillus et 12 % à la forêt mixte. Les trajectoires en Figure IV.35.c et en Figure IV.35.d sont toutes deux pour 50 % dans les feuillus, et dans 45 % et 35 % dans la forêt mixte. Sur les 30 trajectoires simulées, les cerfs parcourent peu les conifères : environ 10 % des localisations simulées y sont situées, ce qui est davantage que dans les observations mais similaire aux simulations pour les chevreuils. Ceci indique que la préférence pour les types de peuplements pour les deux espèces n'est pas assez bien prise en compte par une pondération dans le choix des destinations.
Concernant le relief, respectivement pour les simulations et les observations, les moyennes des altitudes sont de 305 m et de 285 m, et celles des pentes de 18 degrés et de 15 degrés. Les valeurs plus élevées peuvent être liées au fait que les distances simulées sont plus grandes. Même si les moyennes de pentes sont similaires entre observations et simulations, nous constatons que les déplacements de cerfs peuvent s'effectuer sur des pentes fortes mais qu'ils sont moins alternés entre altitudes élevées et basses que dans les déplacements simulés. Par exemple en Figure IV.35.a, le cerf se déplace d'abord en fond de vallée (à droite de la carte) puis finit sa trajectoire en altitude haute. Les 3 résultats de simulation illustrés alternent davantage entre différentes valeurs d'altitude et de pente. Un extrait du déplacement observé est montré en Figure IV.36.a : le cerf aborde un début de côte par l'est et exploite une zone restreinte pendant 3 heures avant de repartir vers le sud en prenant un chemin de pente similaire. Dans les simulations, les cerfs parcourent moins les fonds de vallées. En Figure IV.36.b, nous avons extrait des localisations simulées pendant 1 heure. L'agent parcourt une zone de feuillus à droite de la carte, puis se dirige vers une autre zone de feuillus située en haut de la carte. Dans ce cas, la somme des pentes reste inférieure au seuil fixé (150 degrés) entre les localisations simulées et la trajectoire n'est pas déviée. Ce seuil est peut-être trop faible. Il serait aussi pertinent d'enrichir la prise en compte des pentes par l'agent en ajoutant des directions préférentielles claires sur des chemins de plus faibles pentes.

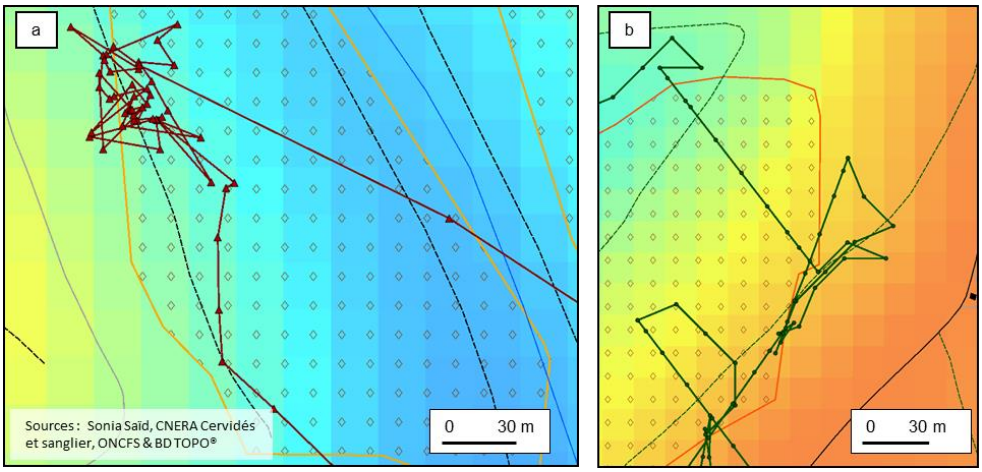


Figure IV.36. Extrait des déplacements d'un cerf : a) regroupement de localisations observées pendant 3 heures, b) déplacement simulé dans une zone de feuillus puis dans un peuplement mixte pendant 1 heure. La légende cartographique est celle de la Figure IV.35.

Pour les voies de communication, le nombre de traversées est plus élevé pour les trois simulations que pour les observations : en moyenne sur les trois trajectoires, il y a 255 intersections contre 55. Pour les intersections avec les cours d'eau, de même le nombre est plus élevé, de 25 en moyenne pour les 3 trajectoires simulées, contre 2 pour les observations. Cette tendance est vérifiée pour les 30 trajectoires alternatives de l'agent. Les traversées des voies et des cours d'eau sont donc surestimées par le modèle, en partie dû au fait que les déplacements simulés s'effectuent sur des distances en moyenne quatre fois plus grandes que dans les observations. Le rapport entre les distances simulées et observées est supérieur à celui entre les superficies des espaces parcourus. Cela indique que la simulation favorise des déplacements passant plusieurs fois aux mêmes endroits et traversant plusieurs fois les mêmes voies (48 voies différentes traversées pour les 30 simulations et 24 voies dans les observations). La distance minimale moyenne aux voies quel que soit leur type est environ de 31 m pour les 30 trajectoires et de 28 m pour l'observation en Figure IV.35.a. L'éloignement relatif aux voies est alors bien représenté dans le modèle.

Les différences dans les comportements implémentés des deux espèces de cervidés résident dans les vitesses de déplacement et les préférences pour certains types de peuplement. Par rapport aux observations, les distances parcourues sont plus élevées lors des simulations pendant une journée pour les chevreuils (8 km contre 13 km) et d'autant plus pour les cerfs (9 km contre 41 km). Le processus de simulation a tendance à surévaluer les déplacements. Cela peut être dû à la vitesse de déplacement fixée pour les cerfs qui est de 100 m/h plus élevée que pour les chevreuils ainsi qu'à la sélection moins stricte des destinations pour les cerfs parcourant de manière plus similaire les forêts de feuillus, de conifères et mixtes. La superficie moyenne des espaces parcourus pendant 24 h est par contre relativement proche entre observations et simulations. La forme de la trajectoire serait donc à améliorer dans le modèle. La sélection plus forte des chevreuils par rapport aux cerfs pour les feuillus et l'évitement des conifères ne sont pas assez représentés par la méthode de sélection des destinations par l'agent. On voit que les simulations sont éloignées des observations, car les ruptures de déplacements selon le type de peuplement forestier et selon la pente ne sont pas assez bien prises en compte. Nous résumons les points à améliorer dans notre modèle dans la partie suivante en IV-3.3.

3.3. Sensibilité du modèle de simulation et propositions d'améliorations

Nous avons visualisé et analysé les résultats de simulation sur trois espèces et deux sites d'étude. Nous étudions à présent la sensibilité des paramètres de notre modèle dans ces mêmes cas d'étude. Nous revenons ensuite sur les analyses des simulations et nous formulons des pistes d'amélioration du modèle.

3.3.1. Étude de la sensibilité du modèle

Nous étudions sur les trajectoires simulées, les effets de la modification des valeurs associées aux propriétés des agents et des paramètres en entrée des méthodes. Concernant les chevreuils en milieu forestier, nous testons la sélection possible d'une même destination plusieurs fois de suite par l'agent. Deux exemples de changement de paramétrage sont ensuite détaillés pour les renards en milieu périurbain : la distance correspondant au rayon de perception de l'agent et le pas de temps de simulation. Nous étudions ensuite quel est l'effet du nombre de trajectoires alternatives construites par un agent avec le même paramétrage du modèle. L'étude de la sensibilité consiste à analyser l'effet du changement des valeurs des propriétés et des paramètres sur les résultats de la simulation. Cette analyse est effectuée en modifiant la valeur pour une propriété et en conservant les autres propriétés et paramètres inchangés. Nous n'avons toutefois pas mené des tests sur l'ensemble des paramètres, par exemple nous n'avons pas testé la traduction dans les résultats de simulation de la modification des paramètres d'audace et de persévérance. Pour chaque paramétrage, 30 trajectoires alternatives sont lancées et la durée de simulation est de 24 h. Les propriétés et paramètres sont les mêmes que ceux définis dans le Tableau IV.3, sauf ceux testés.

Modification de la propriété de sélection des destinations

Dans les tests sur les comportements de déplacement implémentés pour les cervidés en partie IV-3.2, nous avions paramétré le fait que les agents sélectionnent en priorité des destinations qu'ils n'avaient pas déjà parcourues. Nous modifions cette propriété qui correspond à la mémoire de l'agent pour les destinations qu'il a choisies précédemment. Nous relançons les tests pour les chevreuils avec le même paramétrage sauf pour cette propriété : la sélection s'effectue de manière indifférenciée entre les destinations déjà parcourues ou non. Les distances moyennes sur les nouvelles 30 trajectoires simulées sont plus petites que dans le paramétrage précédent : 11 km contre 13 km et l'aire des surfaces parcourues reste similaire autour de 30 ha. Une autre différence réside dans la répartition des localisations dans les différentes essences forestières. Les localisations sont réparties de façon plus égale entre les feuillus (50 %), les conifères (25 %) et les forêts mélangées (25 %). La préférence pour les feuillus est donc moins bien représentée avec ce paramétrage. En effet, la méthode de sélection privilégie en partie la proximité des destinations par rapport à la situation de l'agent. Lorsqu'un agent est situé dans un certain peuplement, celui-ci est susceptible d'être parcouru plus longtemps car la zone arborée correspondante sera potentiellement sélectionnée à nouveau comme destination. Les pentes des localisations ont néanmoins les mêmes valeurs avec les deux paramétrages : autour de 15 degrés (10 degrés pour les observations). Pour étudier l'exploration de l'espace par les animaux, la sélection de destinations identiques paraît moins adaptée car les déplacements sont moins sélectifs au niveau des caractéristiques des zones parcourues. Cependant les distances correspondent mieux. Il faut alors affiner la méthode de déplacement par rapport à la forme des trajectoires et aux préférences spatiales de l'agent.

Le rayon de perception de l'agent

Nous faisons varier le rayon de perception de l'agent qui intervient lors du choix d'une destination. Les valeurs testées sont : 10 m, 50 m et 100 m pour le renard (site d'étude du renard 4 présenté en IV-3.1). Les emprises de l'ensemble des trajectoires sont représentées en Figure IV.37 selon ces 3 rayons. L'estimation des espaces parcourus par leur enveloppe convexe augmente avec la valeur du rayon de perception : 31 ha (rayon de 10 m), 60 ha (rayon de 50 m), 92 ha (rayon de 100 m).

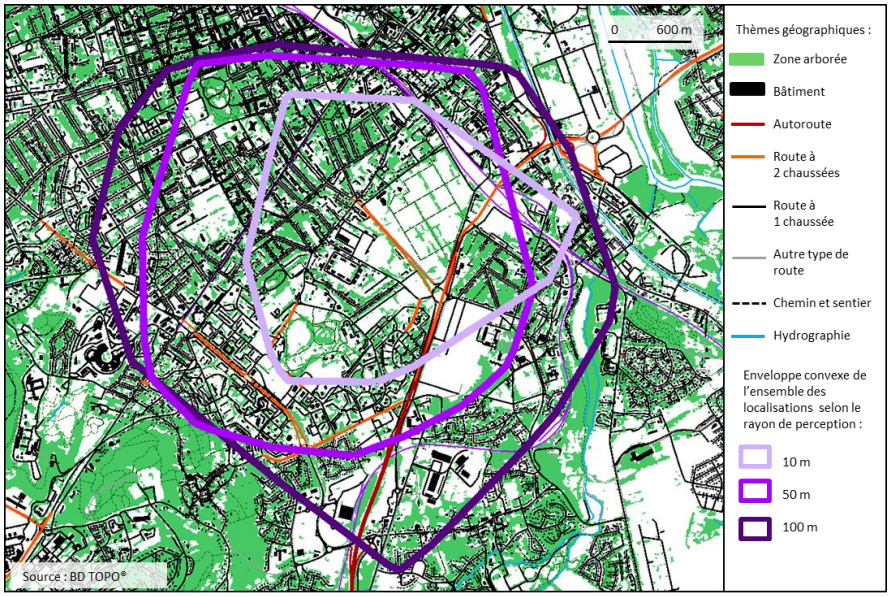


Figure IV.37. Comparaison des espaces parcourus selon trois valeurs du rayon de perception de l'agent - 10, 50 et 100 m : leur superficie augmente avec le rayon.

L'augmentation du rayon de perception entraîne un nombre plus important de destinations potentielles. L'agent peut choisir et se diriger vers des éléments d'intérêt plus éloignés, ce qui élargit l'espace dans lequel il se déplace. D'autres indices sur les trajectoires simulées et leurs situations par rapport aux éléments du paysage sont calculés en Tableau IV.7. Nous remarquons que les distances parcourues en moyenne restent similaires contrairement aux superficies des espaces parcourus : 23,2 km pour 10 m, 20,9 km pour 50 m et 20 km pour 100 m. La seule différence notable est que l'écart-type entre les distances des trajectoires alternatives est plus petit pour le rayon de 10 m, environ de 2,5 km alors qu'il est de 5 km pour les deux autres rayons. Les distances similaires peuvent signifier que pour un petit rayon de perception, l'agent atteint des destinations proches assez rapidement et sélectionne ensuite de nouvelles destinations à proximité. Le modèle compense ces petites distances parcourues par leur fréquence car l'agent est peu arrêté par des obstacles mais si ses destinations sont éloignées, il peut être bloqué. Dans le cas des rayons de 50 m et 100 m, il arrive plus fréquemment que l'agent ne trouve pas de chemin vers sa destination (par exemple s'il est entouré de bâtiments) et qu'il doive en choisir une nouvelle destination au bout d'une certaine durée. Il faudrait alors inclure dans l'algorithme de contournement des obstacles une possibilité de sortie de situations de blocage. En effet, les observations ne rendent pas compte de situation où un renard reste statique en dehors de son gîte de repos.
Les destinations sont soit des zones arborées soit des bâtiments. Le nombre de zones arborées parcourues augmente avec le rayon alors que les superficies ne subissent pas d'évolution particulière. Les distances minimales moyennes aux bâtiments restent également similaires, en diminuant légèrement : de 26,1 m pour le rayon de 10 m à 23,5 m pour celui de 100 m. Les

destinations successives sont logiquement plus éloignées les unes des autres lorsque le rayon de perception est grand. Les chemins entre les destinations sont donc susceptibles de croiser davantage de zones arborées autres que les destinations. La distance minimale moyenne aux routes à 1 chaussée, les plus nombreuses sur le site, est de 39,4 m, 36,0 m et 34,2 m pour les rayons en ordre croissant. Cette distance diminue donc légèrement lorsque le rayon de perception augmente. Comme pour les bâtiments, la diminution des distances minimales peut venir du fait que l'espace parcouru est étendu et que les rencontres avec les routes qui font obstacle aux déplacements sont plus fréquentes. Le nombre de traversées de voies (routes et chemins) double d'ailleurs en passant du rayon de 10 m à celui de 100 m. Le nombre de voies traversées augmente également, de 36 à 125. Cependant, pour les routes à 2 chaussées, la distance minimale moyenne augmente. Cela est probablement lié à la répartition des routes à 2 chaussées situées majoritairement au sud-est du site, direction opposée à celle de la progression générale des trajectoires simulées, ainsi qu'au fait que lorsque le rayon est grand, les agents s'éloignent plus de ces routes à 2 chaussées peu nombreuses.

Tableau IV.7. Influence de la valeur du rayon de perception sur les destinations choisies par l'agent.

Rayon de perception (m)	Distance totale parcourue (km)	Surface parcourue (ha)	Nombre de zones arborées parcourues	Moyenne des aires de surfaces arborées parcourues (ha)	Distance minimale moyenne aux bâtiments (m)	Nombre d'intersections de voies	Nombre de voies intersectées	Distance min. moyenne aux routes à 1 chaussée (m)	Distance min. moyenne aux routes à 2 chaussées (m)
10	23,2	30,9	25	0,33	26,1	1077	36	39,4	240,7
50	20,9	60,3	45	0,39	23,9	1454	79	36,0	282,9
100	20,0	92,3	64	0,35	23,5	2054	125	34,2	313,8
observations	11,5	36,5	17	0,88	24,0	113	83	35,1	264,3

Les écarts-types augmentent avec le rayon de perception et l'aire des espaces parcourus pour les indices suivants : la distance totale, l'aire de l'espace parcouru, le nombre de zones de végétation, le nombre d'intersections avec les voies et le nombre de voies différentes traversées. Ils diminuent par contre pour les distances minimales moyennes aux bâtiments et aux voies d'accès. Plus le rayon de perception augmente, plus les trajectoires alternatives sont différentes. Concernant le relief, faible sur le site d'étude, les valeurs d'altitude et de pente restent similaires quel que soit le rayon de perception, avec des altitudes légèrement plus élevées pour le rayon de 100 m car les trajectoires correspondantes se situent sur des altitudes plus diverses, notamment au sud du site avec des altitudes un peu plus élevées. La modification du rayon de perception a donc une conséquence indirecte sur la situation des trajectoires sur le relief via l'espace parcouru.

Le rayon de perception a donc pour principal effet d'augmenter le nombre d'éléments du paysage parcourus (zones arborées) et traversés (routes), en élargissant les espaces parcourus. Les trajectoires semblent par contre plus cohérentes pour un petit rayon (10 m) avec une stabilité dans les distances entre les trajectoires alternatives d'un agent et moins de situations de blocage d'un agent par les obstacles. Le rayon de perception de 50 m semble être un bon compromis entre cette cohérence de forme des trajectoires et la superficie de l'espace parcouru (60 ha en moyenne pendant une journée alors que pour le renard suivi il est de 170 ha également pendant 24 h, et pour les 4 renards la moyenne des espaces parcourus est de 96 ha).

Le pas de temps de simulation

Le pas de temps de simulation est celui de la durée écoulée entre la création de deux localisations par un agent. Nous lançons des simulations pour deux pas de temps différents : 1 minute et 2 minutes, pour le même paramétrage que précédemment et un rayon de perception égal à 50 m. Une durée plus grande entraîne une distance théorique à parcourir pour l'agent plus élevée pour une même vitesse. La distance totale est similaire pour les deux pas de temps différents, égales à 20 et 21 km parcourus pendant 24 h (11,5 km dans les observations). L'espace parcouru est par contre moins large, de l'ordre de 25 ha pour le pas de temps de 2 min, ce qui se rapproche des observations à 17 ha ainsi que des résultats du test précédent avec un rayon de perception égal à 10 m. Le nombre d'intersections avec les routes est aussi moins élevé, 573 pour un pas de 2 minutes et 1454 pour celui de 1 minute. Ce nombre reste cependant beaucoup plus élevé que dans les observations (113). La distance minimale moyenne aux voies (routes et chemins) reste autour de 15 m dans les deux cas (28 m pour les observations). Celle aux bâtiments diminue un peu avec l'augmentation du pas de temps, de 23,9 m à 15 m. Elle est de 24 m dans les observations, ce qui indique que l'agent peut avoir des difficultés à trouver un chemin pour contourner les bâtiments. Le pas de temps de 2 min complique la détermination par l'agent de sa trajectoire car il doit parcourir une distance plus grande en prenant en compte les mêmes obstacles. Notre algorithme est plus adapté pour des petit pas de temps de simulation car l'évitement des obstacles s'effectue en fonction des contours des obstacles. Pour des grands pas de temps, la méthode de déplacement par fonction de coût, que nous avons proposé, semble plus adaptée car elle synthétise l'information spatiale et l'agent peut passer outre le contour des éléments du paysage tout en indiquant la direction de déplacement la plus intéressante. Cette fonction de coût peut être adaptée en diminuant la taille des parts de l'espace prises en compte pour définir la direction de déplacement afin que l'agent contourne les obstacles et parcourt les zones d'intérêt de manière plus réaliste. Le pas de temps de 1 min semble bien adapté au processus de simulation avec la méthode par projetés de rayon car cela permet à l'agent de contourner les obstacles hermétiques (bâtiments) plus facilement en déviant sa trajectoire.

Le nombre de trajectoires alternatives construites

La construction d'une trajectoire par un agent dans notre module prend un certain temps. Comme cette construction est non déterministe, il est recommandable de lancer plusieurs alternatives de trajectoire par agent et pour chaque scénario. Cela prend d'autant plus de temps que le nombre d'alternatives est élevé. Il s'agit de trouver un compromis entre la durée pour créer les trajectoires et un nombre garantissant une bonne représentation des résultats de simulation. Le temps de lancement dépend du type de milieu car il augmente avec la quantité d'objets géographiques chargés dans l'environnement agent. La quantité des zones arborées, des bâtiments et des routes est notamment importante car ces éléments représentent des destinations et des obstacles potentiels. Sur l'agglomération de Nancy en milieu urbanisé pour un agent de l'espèce renard, le temps de calcul d'une trajectoire est plus élevé que pour un chevreuil en milieu forestier qui contient moins de bâti et des zones arborées plus larges mais moins nombreuses. Par exemple sur un site autour de Nancy et pour un agent – renard – avec un rayon de perception de 50 m et un pas de temps de simulation de 1 min, la durée moyenne de construction d'une trajectoire de 24 h est de 8,5 minutes (minimum de une minute et maximum de 20 minutes). Cette durée calculée comprend la définition point par point de la trajectoire et l'écriture des résultats dans la base de données. Pour le lancement des 50 trajectoires, la durée totale est environ de 7 h. Par comparaison sur le site d'étude des Vosges pour un agent – chevreuil ou cerf –, la construction d'une trajectoire pendant 24 h prend environ 1 min en moyenne.

Le nombre de trajectoires lancées est un paramètre de simulation intéressant à tester pour la durée consacrée au lancement des trajectoires car une part de l'interprétation des résultats de simulation repose sur des calculs de moyennes sur les trajectoires alternatives. Nous regardons l'effet du nombre de simulations sur les valeurs de ces indices. Nous étudions ainsi les valeurs pour les lancements de 10, 20, 30, 40 et 50 trajectoires. Les différences des valeurs moyennes obtenues pour chaque nombre de lancements sont comparées deux à deux (par exemple la distance moyenne pour 20 trajectoires à laquelle on soustrait la distance moyenne pour 10 trajectoires). Ces différences sont plus élevées de manière générale entre les lancements de 10 et de 20 trajectoires, qu'entre les autres lancements (voir Tableau IV.8). C'est notamment le cas pour la distance totale, la surface parcourue, les zones arborées – parcours, nombre et superficie –, les voies d'accès traversées – nombre de voies et d'intersections. Les distances minimales moyennes présentent des différences sans évolution ordonnée. Les effets du nombre de trajectoires lancées restent ici faibles. Par exemple, la distance minimale moyenne aux bâtis pour 10 trajectoires est égale à 19,4 km, pour 20 : 21 km, pour 30 : 20,3 km, pour 40 : 20,2 km et pour 50 : 20,9 km, ce qui est dans tous les cas un peu plus faible que dans les observations (24 m).

Tableau IV.8. Les différences calculées deux à deux entre les valeurs moyennes des trajectoires simulées en nombre croissant (10, 20, 30, 40 et 50).

Comparaison entre les nombres de trajectoires	Distance totale (km)	Surface parcourue (ha)	% de localisations hors des zones arborées	Nombre de zones arborées parcourues	Moyenne des aires de zones arborées (ha)	Nombre d'intersection de voies	Nombre de voies intersectées	Distance minimale moyenne aux voies (m)	Distance minimale moyenne aux bâtis (m)
10 & 20	1,6	6,9	-1,7	5,4	-377,6	222,6	18,4	0,7	0,8
20 & 30	-0,7	-3,3	2,2	-3,6	209,2	-14,5	-0,7	0,0	-0,7
30 & 40	-0,1	3,1	-0,1	1,1	-43,2	108,1	4,6	0,0	-1,7
40 & 50	0,7	0,2	-0,7	0,8	-15,1	-46,8	-1,4	0,5	1,0

Nous choisissons un lancement d'au minimum 30 trajectoires par scénario testé afin de disposer d'une quantité significative. Cela nous permet de visualiser des résultats différents pour un même agent dans le cadre d'un paramétrage identique.

3.3.2. Propositions d'améliorations des comportements agent modélisés

Le lancement des simulations à partir de notre modèle théorique nous a permis de voir que les trajectoires créées présentent des différences parfois très importantes avec les observations. Nous formulons quelques remarques sur l'amélioration possible du modèle de simulation dans les deux cas d'étude, sur les renards en milieu périurbain et sur les cervidés en milieu forestier.

La modélisation des déplacements des renards en milieu périurbain

Pour les comportements des renards, nous proposons plusieurs pistes pour augmenter la cohérence et le réalisme des trajectoires construites par les agents.

- L'amélioration de l'alternance de rythme entre période diurne et période nocturne

L'objectif de notre modèle de simulation est de représenter par où passent les animaux. La question est d'identifier quels sont les lieux qui sont potentiellement évités et non parcourus par les animaux car il y a trop d'obstacles, et quels sont ceux qui sont favorables aux déplacements. Suite aux lancements des simulations, nous constatons que la question du rythme des

déplacements est importante pour améliorer le réalisme des trajectoires simulées, notamment sur deux points.

- Les renards ont des gîtes de repos diurnes où ils restent à proximité pendant la journée. Les déplacements pour chercher des ressources s'effectuent sur de plus longues distances en période nocturne : ces déplacements partent d'un gîte et reviennent à un gîte. Dans les observations, les gîtes de départ et d'arrivée sont proches, ainsi les trajectoires font une boucle. Notre modèle pourrait alors prévoir de définir un lieu de gîte, comme départ et arrivée, pour la période nocturne et pendant la journée l'agent resterait à proximité de ce lieu de gîte. Nous pourrions par exemple pendre comme point de départ le centroïde des localisations diurnes observées (jour j) puis simuler des déplacements nocturnes (nuit du jour j au jour j+1, pendant 12 h) jusqu'à un point d'arrivée qui pourrait être le centroïde des localisations diurnes enregistrées du jour j+1.
- Les vitesses de déplacements simulés sont plus proches entre elles, et leur valeur maximale est moins élevée que dans les observations. Il serait alors intéressant d'intégrer à la détermination des vitesses une accélération possible lorsque l'agent change de destination ou lorsqu'il y a peu d'obstacles. Au lieu de considérer la vitesse moyenne estimée à partir des observations, les vitesses pourraient être incluses dans un intervalle de valeurs, notamment selon la période de la journée. Les distances parcourues sont aussi trop importantes pour les renards lorsque l'on considère une durée de 24 h. Pour améliorer la cohérence des déplacements simulés, il faudrait ne considérer que les observations pendant la période nocturne et simuler les déplacements pendant cette même période. Nos simulations restent toutefois exploitables pour estimer par la suite les effets d'aménagements sur le parcours de l'espace par des animaux.

- La sélection des destinations

Les destinations sont des éléments d'intérêt de végétation arborée et de bâti. Nous avons constaté que les trajectoires simulées sont un peu plus proches du bâti que dans les observations. Le modèle pourrait diminuer la durée d'exploitation correspondant à la phase de recherche de ressources autour des bâtiments afin de ne pas surestimer cette proximité. Il serait également pertinent de spécifier dans le modèle les types de bâtiments les plus fréquentés par les renards (par exemple des grandes surfaces disposant d'aires de stationnement avec de la nourriture abandonnée et des poubelles). Le nombre de zones arborées parcourues est aussi surestimé dans les simulations car le modèle favorise les déplacements de recherche de nouvelles destinations. Pour diminuer ce nombre, il faudrait définir des algorithmes plus complexes qui prennent en compte la mémoire de l'agent plus précisément, par exemple en alternant la possibilité de revenir sur des destinations déjà visitées. Un autre point est d'adapter l'attraction des destinations en fonction des éléments du paysage présents sur les sites d'étude : l'intérêt du bâti est moindre pour les renards en milieu rural car il y a d'autres occupations du sol intéressantes comme les prairies et les champs cultivés.

- Le contournement des obstacles et le choix des lieux de déplacement

Le comportement d'appréhension des obstacles par les renards n'est pas connu précisément. Notre algorithme fait en sorte que l'agent longe cet obstacle jusqu'à le traverser ou s'en éloigner. Cela entraîne une proximité aux obstacles plus grande que dans les observations, par exemple par rapport aux routes que l'agent essaye de traverser. Le modèle surestime la proximité des routes lors des traversées même si en parallèle, il prend en compte leur évitement lors de la sélection du choix des destinations. L'algorithme de déplacement pourrait par exemple intégrer dans le contournement des obstacles un éloignement relatif avant une nouvelle tentative de traversée. Il pourrait s'agir d'une propriété de l'agent qui aurait une distance

d'influence pour les éléments du paysage, ce qui le tiendrait relativement éloigné de cet élément.
Nous pourrions assouplir notre algorithme par projetés de rayon car cela pose un problème de construction de trajectoires dans le cas où le pas de temps de simulation est plus grand que 1 min et que les distances entre deux localisations créées sont plus grandes. Il faudrait enrichir la méthode de construction de trajectoires en permettant à l'agent de trouver des chemins même s'il y a beaucoup d'obstacles autour de lui, par exemple en reprenant un algorithme de type A* même s'il serait plus coûteux à implémenter.
En outre, l'environnement agent ne décrit pas complètement l'environnement spatial et vivant des animaux. La présence de dérangements et d'éléments d'intérêt non représentés dans notre modèle pourrait être modélisée par des déplacements avec des vitesses et des angles relatifs aléatoires lorsqu'il n'y a pas d'obstacles pour guider les trajectoires.

La modélisation des déplacements des cervidés en milieu forestier

Nous avons pu constater plusieurs écarts entre les comportements de déplacement observés chez les chevreuils et les cerfs en milieu forestier et ceux simulés. Nous revenons sur ces différences et sur les améliorations possibles.

- La forme des trajectoires

Pour le chevreuil :
- Les espaces parcourus sont trop larges pour des déplacements quotidiens, même si les distances parcourues restent cohérentes avec les observations. Une restriction de la surface de cet espace parcouru dans l'environnement agent pourrait augmenter le réalisme de la simulation : cela limiterait les possibilités de destinations et l'éloignement de l'agent par rapport à sa localisation initiale.
- La forme des trajectoires simulées présente moins de regroupements que dans les observations. Dans notre modèle, les périodes de déplacement vers une destination et d'exploitation de cette destination sont alternées. Afin de représenter les regroupements, la durée d'exploitation pourrait être allongée pour certaines destinations alors que pour d'autres destinations, l'agent ne ferait qu'y passer.

Pour le cerf :
- Les distances simulées parcourues pour cette espèce sont trop importantes mais l'espace parcouru reste cohérent, contrairement au chevreuil. La vitesse de déplacement pourrait alors être diminuée. Toutefois, l'amélioration tient probablement dans un meilleur réalisme de la forme des trajectoires comme décrit ci-après.
- La simulation ne représente pas bien l'alternance entre regroupements de localisations et déplacements rapides plus ou moins rectilignes. Il s'agit d'améliorer la gestion du rythme par les agents et ceci dans une certaine surface : une phase avec beaucoup de déplacements sur de petites distances dans un espace restreint pouvant correspondre à du repos ou à une exploitation intensive de l'espace (alimentation), et une phase avec des déplacements rapides et avec peu d'exploitation de l'espace. Une amélioration qui pourrait être significative mais qui appelle à une complexification importante de l'algorithme est d'intégrer une définition explicite des distances et des angles de direction de l'agent. L'agent pourrait avoir des plages temporelles pendant lesquelles il se déplace sur de petites distances et changent beaucoup de direction, et des plages pendant lesquelles la distance entre ses localisations créées est grande et les angles relatifs faibles.
Une des autres raisons au manque de réalisme de la forme des trajectoires est la prise en compte limitée de la composition en éléments arborés dans un milieu forestier. Ceci est en

rapport avec notre méthode d'exploitation des destinations qui fait qu'un agent parcourt la totalité d'une surface arborée, et non une partie comme c'est le cas lorsqu'un cerf se nourrit. En milieu urbain, les zones de végétation sont petites et fragmentées, ce qui permet d'avoir un parcours de l'espace plus cohérent par l'agent entre et sur les destinations sélectionnées. En milieu forestier où les parcelles homogènes par type de peuplement sont plus importantes en surface, le parcours de ces destinations est peu réaliste. Il serait judicieux de réduire les unités du paysage considérées comme destination en découpant l'espace ou en enrichissant la caractérisation de celui-ci. Par exemple, nous pourrions utiliser les données de la base Carte Forestière qui contient une description des peuplements forestiers plus précise que la BD TOPO® ainsi que les résultats des analyses statistiques sur les préférences de fréquentation de ces peuplements par les animaux. Nous pourrions également distinguer l'intensité de la fréquentation en fonction du type de mobilité : déplacement rapide dans certains peuplements et faible mobilité dans d'autres. L'algorithme par projetés de rayon ne tient pas compte des zones d'intérêt entre la position actuelle de l'agent et ses destinations successives. Il ne prend en compte que les obstacles, mais il serait intéressant de l'enrichir.

- Les préférences spatiales :

Les préférences spatiales et l'influence des obstacles au déplacement sont de manière générale sous-estimées pour les deux espèces.
Pour le chevreuil :
- Sa préférence pour les feuillus (chênaies, jeunes peuplements) est respectée dans le modèle mais moins son évitement pour les conifères. Pourtant, la pondération que nous avions attribuée dans la méthode de sélection des destinations marque bien la différence. Les peuplements de conifères peuvent en effet être traversés par l'agent pour atteindre des destinations correspondant à des peuplements de feuillus, alors que ce n'est pas le cas dans les observations. Par contre, les peuplements mixtes sont traversés par les chevreuils par des déplacements rapides (cf. résultats des analyses statistiques). Les méthodes de sélection des destinations et de déplacements pourraient intégrer des probabilités de préférences explicites selon les types de peuplements, ce qui permettrait de contrôler la présence des agents dans ces peuplements.
- Le modèle sous-estime le rôle des pentes. Son influence est d'ailleurs plus importante pour le chevreuil que pour le cerf (significativité du test de Mann-Whitney plus grande pour le chevreuil, cf. III-2.5.2). Les chevreuils restent peu sur des pentes fortes : la méthode de déplacement pourrait introduire de même que pour les types de peuplements une sélection explicite des pixels du MNT de faible pente. Les analyses de données montrent que les chevreuils restent plus longtemps sur les pentes faibles mais peuvent se déplacer rapidement dans les pentes fortes. Nous pourrions introduire en fonction des phases de déplacement et d'exploitation des destinations cette distinction explicite dans la présence des chevreuils sur les pentes.
Le modèle sous-estime également l'évitement des voies par les chevreuils. Elles sont plus traversées et la distance minimale moyenne est plus petite, ce qui marque une proximité non observée. Dans la construction de la trajectoire, la méthode pourrait calculer la distance aux voies et choisir celle qui est la plus éloignée des voies.

Pour le cerf :
- Les traversées des voies sont plus nombreuses dans les simulations, ce qui est en partie dû aux grandes distances correspondantes. La correction de ce problème passe par une amélioration de la forme des trajectoires et éventuellement par une probabilité de traversée plus faible. La distance minimale moyenne reste réaliste, ce qui indique que l'éloignement moyen aux voies dans le comportement agent est correctement représenté. Nous pourrions toutefois intégrer

dans le modèle une adaptation du rôle des routes sur les déplacements. Nous avions remarqué dans le chapitre III que les animaux suivent certains types de voies (routes forestières avec un trafic très faible), probablement par facilité de déplacement et opportunité de ressources alimentaires notamment d'herbacées en bordure. Le modèle pourrait intégrer cette préférence pour améliorer le réalisme des trajectoires.
- L'influence des pentes est sous-estimée, dans le sens où les cerfs parcourent des pentes fortes mais de manière ponctuelle alors que dans le modèle le parcours de pentes fortes est plus fréquent.
- Comme pour le chevreuil, la préférence pour les feuillus n'est pas assez prise en compte dans le choix des destinations de l'agent. Il faudrait intégrer explicitement une préférence lors de la construction de la trajectoire vers et à l'intérieur des destinations de feuillus. Il serait également beaucoup plus réaliste de prendre en compte le détail des essences arborées.

Le modèle de simulation semble davantage fonctionner pour les renards en milieu périurbain que pour les cervidés en milieu forestier. Les méthodes de construction des trajectoires dépendent beaucoup des sélections d'élément du paysage en tant que destination et du contournement des obstacles. Ces éléments du paysage sont plus nombreux en milieu périurbain. Cela permet de dessiner une trajectoire plus réaliste représentant notamment une exploration de l'espace par l'animal. L'amélioration des méthodes de simulation est une perspective. Une piste intéressante est la prise en compte plus directe des influences de l'espace sur les déplacements. Il s'agirait de combiner les facteurs d'influence, par exemple pour les cervidés, les facteurs de choix de direction en fonction du type de peuplement, de la valeur de pente, de la présence de voies. Une autre piste est de mieux prendre en compte le comportement des animaux : alternance entre repos, alimentation et parcours plus rapide pour les cervidés, prise en compte du rythme diurne/nocturne pour le renard. La situation des trajectoires est toutefois en moyenne cohérente avec les observations – emplacement par rapport aux éléments du paysage. Les trajectoires simulées permettent de visualiser où se situent et où passent les animaux dans un espace caractérisé.

3.4. Test sur l'environnement agent : ajout des barrières en milieu périurbain pour les renards

Afin d'améliorer les résultats de simulation, nous avons identifié des pistes pour modifier les comportements des agents. Il est également possible de modifier l'environnement agent en l'enrichissant par des éléments du paysage non représentés dans les bases de données géographiques que nous avons utilisées jusqu'à présent dans la thèse. Nous nous intéressons aux éléments qui font potentiellement barrière aux déplacements des renards en milieu périurbain et que nous avions mentionnés dans la partie III-2.4.2 : les clôtures, les grillages et les murs qui entourent des terrains privés et délimitent des parcelles. Notre démarche est de comparer les résultats de simulation dans l'environnement agent composé des thèmes {route et chemin, bâtiment, zone arborée, hydrographie} avec les résultats dans l'environnement agent après l'ajout des barrières. Le site d'étude est à Villers-lès-Nancy et correspond à l'un des renards suivis par l'Anses. Nous avons numérisé les éléments à partir des observations sur le terrain et en reprenant les emprises sur les photos aériennes (prise de vue en Figure III.55.b et photographie aérienne en Figure III.58). Leur cartographie est montrée sur les résultats de simulation en Figure IV.38. Les éléments de barrière ajoutés concernent :

- les grillages entourant les terrains de sport universitaires et le parc urbain ;
- les murs autour du bois au sud-ouest du site ;

- les clôtures et les barrières diverses délimitant les propriétés dans la zone résidentielle entre le parc et l'université.

L'agent construit 50 trajectoires alternatives à partir d'une même localisation initiale qui est un des points GPS enregistrés et qui correspond à la journée de suivi cartographiée en Figure IV.38.a. Nous avons fixé la probabilité de traversée des barrières à 10 % quel que soit leur type. Cette probabilité représente le fait que ces barrières freinent les déplacements et que l'animal va chercher à les contourner. Cependant, l'ensemble de ces barrières ne sont pas hermétiques. Elles peuvent être abîmées ou peuvent présenter des coupures, et il reste alors possible de les traverser, notamment pour un renard comme le montrent les observations.

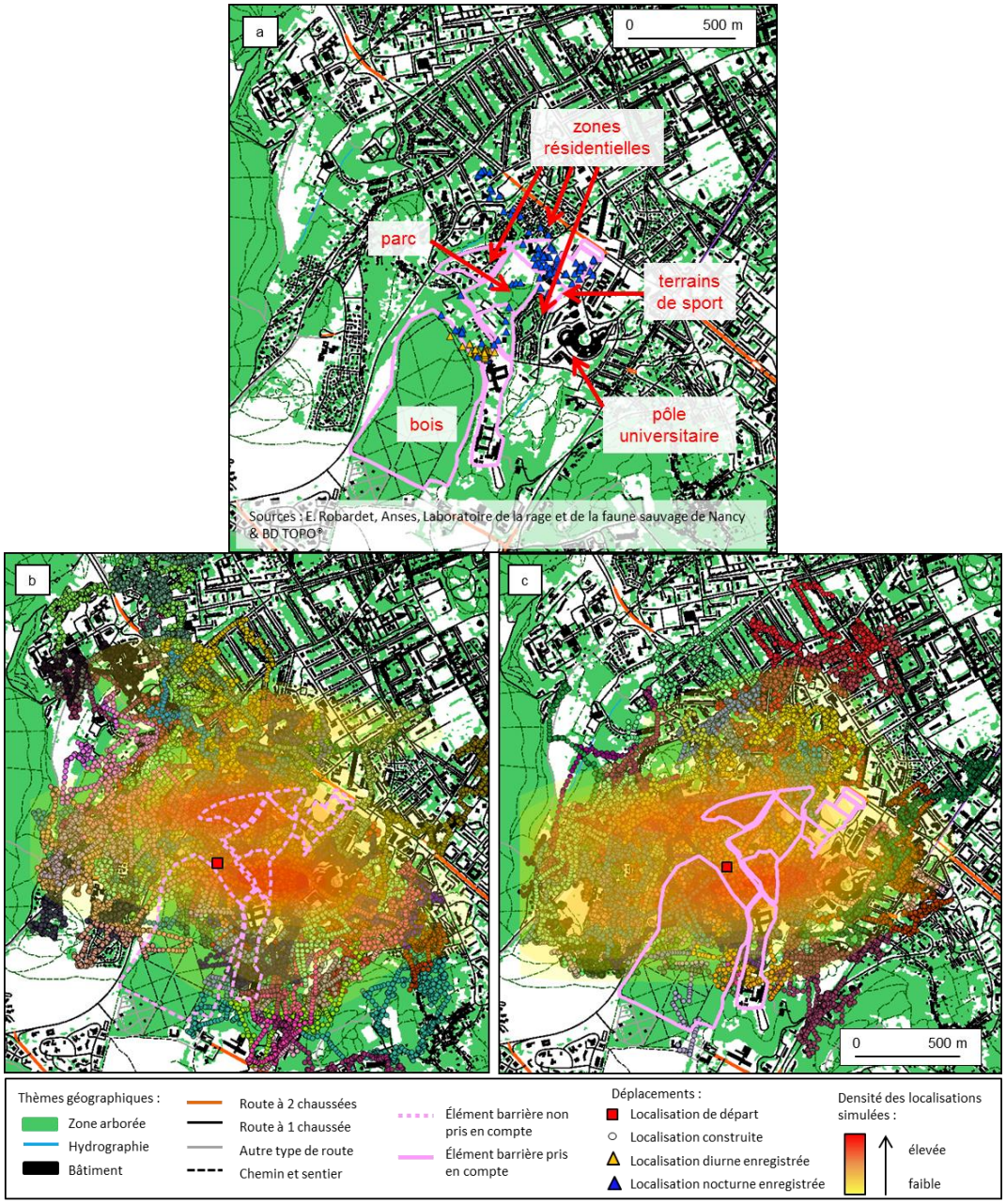


Figure IV.38. Les observations de localisations d'un renard et de la présence de barrières sur un site d'étude autour de Nancy et les résultats de simulation pour le renard à partir d'un même point initial : a) carte des localisations observées d'un renard pendant une journée et des barrières, b) simulation dans un environnement sans prendre en compte les barrières ajoutées, c) simulation dans un environnement agent avec les barrières.

La Figure IV.38 permet la comparaison entre les déplacements observés d'un renard pendant une journée et les simulations sur une même durée dans un environnement agent sans les éléments de barrière dans un premier temps, puis avec dans un second temps. Les localisations observées à partir d'un même point initial sont majoritairement situées en lisière du bois – lieu de repos correspondant à la période diurne – et au nord des terrains de sport – déplacements pendant la nuit. Dans les deux environnements agent, des zones de concentration des localisations peuvent être relevées au nord du bois et du parc urbain ainsi que dans la zone résidentielle entre le parc et les bâtiments de l'université. Nous retrouvons entre observations et simulations, des zones proches au niveau de la densité. Quelques trajectoires construites s'éloignent dans des lieux plus densément urbanisés mais elles vont dans des directions différentes les unes des autres et sont peu regroupées. La zone résidentielle au nord, très fréquentée par le renard, l'est peu dans les simulations avec ou sans barrières, ce qui peut montrer que l'intérêt de cette zone n'est pas bien pris en compte dans les simulations. Les trajectoires simulées sont davantage dans des zones avec un bâti dense. D'après une interprétation visuelle, il y a relativement peu de changements entre la répartition des déplacements construits dans les deux environnements, sans et avec éléments de barrière. On observe toutefois que les densités les plus importantes de localisations ne sont pas exactement les mêmes dans les deux cas. Dans l'environnement avec barrières par rapport à celui sans, les déplacements ont davantage lieu à l'ouest et au sud du bois urbain, notamment au sud de la barrière (un mur) qui le borde. Les déplacements sont par contre plus nombreux vers le sud-ouest de ce parc lorsque les barrières ne sont pas prises en compte. L'agent est moins présent dans la zone résidentielle à l'ouest du parc lorsque les barrières sont prises en compte (tache orange un peu plus claire). Cette prise en compte des barrières permet de corriger un peu cette sur-fréquentation (non observée par ailleurs). Cela peut venir de la série d'obstacles situés au centre du site, entre les barrières du parc et des propriétés résidentielles. Les déplacements simulés avec les barrières sont davantage dirigés vers la zone de bâti dense au nord du site. Nous avons recalculé les valeurs concernant les relations entre les éléments du paysage et les déplacements ; elles sont indiquées en Tableau IV.9.

Tableau IV.9. Les valeurs moyennes calculées pour les 50 trajectoires lancées pour un renard à partir d'un même point initial dans un environnement sans puis avec prise en compte des barrières.

Environnement agent	Distance totale (km)	% des localisations dans une zone arborée	Nombre de zones arborées parcourues	Moyenne des surfaces des zones arborées parcourues (ha)	Nombre de voies traversées	Distance minimale moyenne aux voies d'accès (m)	Distance minimale moyenne aux bâtiments (m)
sans barrières	20	39	51	2	128	15	20
avec barrières	17	36	41	4	91	14	23

Les distances totales moyennes parcourues diminuent un peu, de 20 km à 17 km, lorsque l'on prend en compte les barrières. Ceci peut paraître logique car les obstacles freinent les déplacements et ceux-ci se trouvent plus localisés à proximité des barrières. Avec les barrières, le pourcentage des localisations dans les zones arborées est légèrement plus petit, ainsi que le nombre de zones arborées. Leurs surfaces sont par contre plus grandes. De petites zones arborées sont en effet plus nombreuses dans la zone résidentielle davantage parcourue lorsque les barrières ne sont pas prises en compte. Les distances minimales moyennes sont un peu plus élevées pour les bâtiments, et similaires pour les routes. Le nombre de voies traversées est plus grand sans les barrières, du fait des distances parcourues plus élevées. L'enrichissement des bases de données permet de tester des hypothèses sur l'influence d'éléments du paysage particuliers. Ici, le rôle des clôtures sur une petite zone ne suffit pas à tirer des conclusions

nettes sur l'importance de leur influence réelle. Nous pouvons pourtant remarqué que la considération des barrières permet d'affiner la description du bâti en distinguant les zones pavillonnaires comprenant beaucoup de barrières, des zones de bâti moins denses et plus favorables aux déplacements. Un enrichissement du modèle peut donc passer par une caractérisation du bâti en milieu urbain et périurbain. Une autre remarque est que les barrières ne sont pas de même type et n'ont pas la même influence en milieu urbanisé et en milieu rural qui est moins contraint. Une pondération des barrières selon leur type serait pertinente. Les conséquences au niveau des déplacements construits montrent toutefois l'adaptabilité du modèle de simulation et la possibilité d'enrichir la description de l'environnement agent.

3.5. Simulation de déplacements pour trois espèces animales sur un même site d'étude

Nous avons testé les comportements agent de notre modèle pour les trois espèces animales en comparant avec les observations sur un même site d'étude. Nous avons pu identifier quelles étaient les différences et les simplifications du modèle par rapport à la réalité. Nous souhaitons nous rendre compte si les comportements restent cohérents dans un site d'étude de milieu différent de celui où se situent les animaux suivis : milieu forestier pour les cervidés et milieu urbanisé pour les renards. Nous allons tester par la suite des modifications du paysage et voir si cela impacte les déplacements des espèces animales. Il est alors intéressant de considérer plusieurs espèces, et ceci sur un même site, et nous prenons l'exemple des trois espèces étudiées. Nous nous intéressons toujours aux déplacements pendant une journée, de type exploratoire c'est-à-dire sans destination fixée, afin de pouvoir analyser les déplacements en rapport avec les simulations des tests précédents correspondant au même type de déplacement.

Le site d'étude choisi correspond à celui parcouru par un renard dans l'agglomération de Nancy pouvant être qualifié de périurbain mais peu urbanisé. Ce site d'étude a l'avantage de couvrir potentiellement les besoins en habitat des trois espèces renard, chevreuil et cerf. Nous pouvons ainsi comparer les comportements sur un espace commun potentiellement parcouru et nous pourrons simuler des aménagements et voir les conséquences sur les trois espèces. Ce site s'étend sur une commune et contient un centre-ville, des zones résidentielles et des bois. Des prairies et des champs de culture composent également l'espace mais nous ne disposons pas des données détaillées. Nous ne les avons pas incluses dans l'environnement agent ainsi que dans le modèle de simulation. Nous avons représenté en Figure IV.39 les éléments du paysage composant l'environnement agent et l'emprise surfacique dans laquelle doivent être comprises les destinations sélectionnées par les agents. Le site présente une répartition particulière de l'occupation du sol. Le centre-ville de la commune et les zones pavillonnaires sont situés au nord-ouest, contenant en tout environ 1200 bâtiments et représentant 10 % de la surface du site d'étude qui lui-même s'étend sur 15,5 km². Ces zones bâties contiennent également de petites zones arborées fragmentées, au nombre d'environ 350. Ces zones arborées peuvent correspondre à des jardins individuels, à des parcs urbains ou à des rémanents de bois préservés lors du processus d'urbanisation. Le reste du site est composé de bois (environ 100 entités) avec des surfaces importantes jusqu'à 3,5 km² pour l'ensemble continu boisé au nord-est. Sur son ensemble, le site est recouvert à 40 % de végétation arborée dont 10 % en surface sont associés aux zones bâties. Les voies de communication sont de divers types, mais sans autoroute et avec qu'une unique route à 2 voies séparées. La moitié des routes ont une voie, 10 % ne sont pas goudronnées et le reste du réseau est constitué de chemins et de sentiers. Il n'y a pas de voies ferrées. Les cours d'eau sont au nombre d'une dizaine.

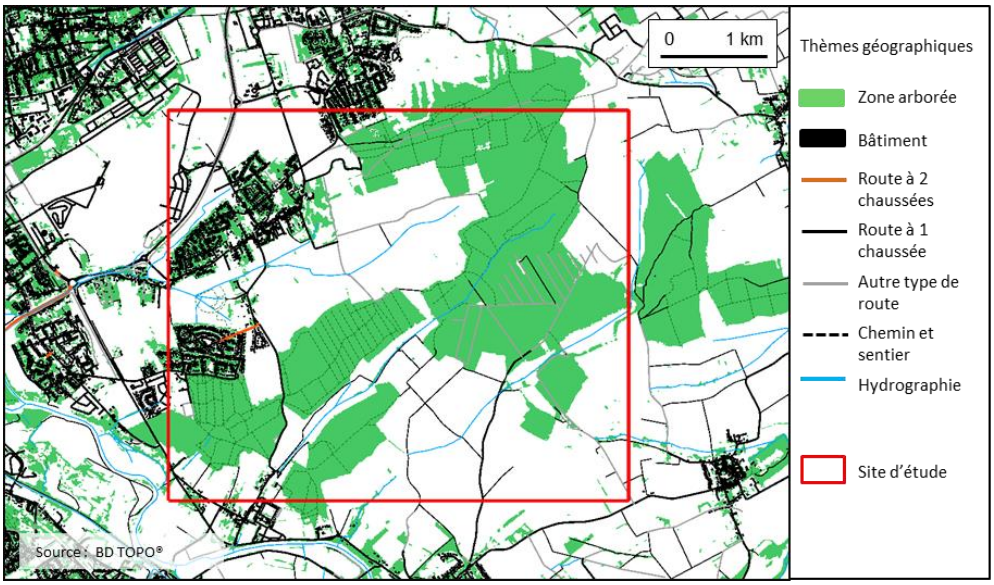


Figure IV.39. Cartographie du site d'étude en périphérie de Nancy sur laquelle nous lançons des simulations pour trois espèces animales. Ce site correspond à celui d'un des renards suivis.

Les paramètres de simulation sont présentés dans le Tableau IV.10. Les différences entre les comportements agents des espèces animales résident dans :

- les vitesses de déplacement. L'espèce renard est associée à une vitesse moyenne beaucoup plus rapide que les cervidés, traduisant le fait que les renards se déplacent sur plusieurs kilomètres en une nuit alors que les chevreuils et les cerfs le font en 24 h en alternant avec des pauses. Les cervidés se nourrissent plus régulièrement que le renard ;
- les thèmes correspondant aux destinations potentielles : bâtiments et zones arborées pour les renards et uniquement zones arborées pour les chevreuils et les cerfs ;
- le choix des destinations lié à la mémoire de l'agent : sélection unique des destinations par les agents de l'espèce renard et potentiellement redondante pour les cervidés. L'information sur les types de peuplements n'est pas disponible dans la BD TOPO® (comme sur l'ensemble du département de Meurthe-et-Moselle au moment des tests) et les zones arborées sont différenciées que par leur seule superficie.

La prise en compte des pentes n'est pas effective car celles-ci sont faibles sur le site, en-dessous de 10 degrés, et n'ont donc que peu d'influence sur les déplacements des trois espèces. Les probabilités de traversée des obstacles sont les mêmes entre les espèces, ce qui nous permet de voir si les autres propriétés de l'agent différencient correctement les comportements agents.

Tableau IV.10. Les valeurs des paramètres pour le test de simulation de déplacements des trois espèces animales sur un site d'étude commun en périphérie de Nancy. Les probabilités de traversée des obstacles sont identiques pour les 3 espèces.

Espèce	Motivation	Méthode de déplacement	Pas de temps de simulation (sec.)	Vitesse moyenne (km/h)	Persévérance	Rayon de perception (m)	Durée max avant un changement de destination (min)	Sélection possible d'une même destination
renard	exploratoire	projetés de rayon	60	2,2	1	50	10	non
chevreuil				0,35				oui
cerf				0,45				oui

Probabilité de traversée des obstacles				
Chemin et sentier	Route non goudronnée	Route à une chaussée	Route à deux chaussées	Cours d'eau
1	0,5	0,3	0,2	0,5

Nous représentons la cartographie des résultats de simulation en Figure IV.40. 50 localisations initiales ont été définies aléatoirement sur l'ensemble du site. Elles constituent les points de départ des 50 trajectoires lancées pour une durée de 24 h par un même agent correspondant alternativement à chacune des trois espèces animales.

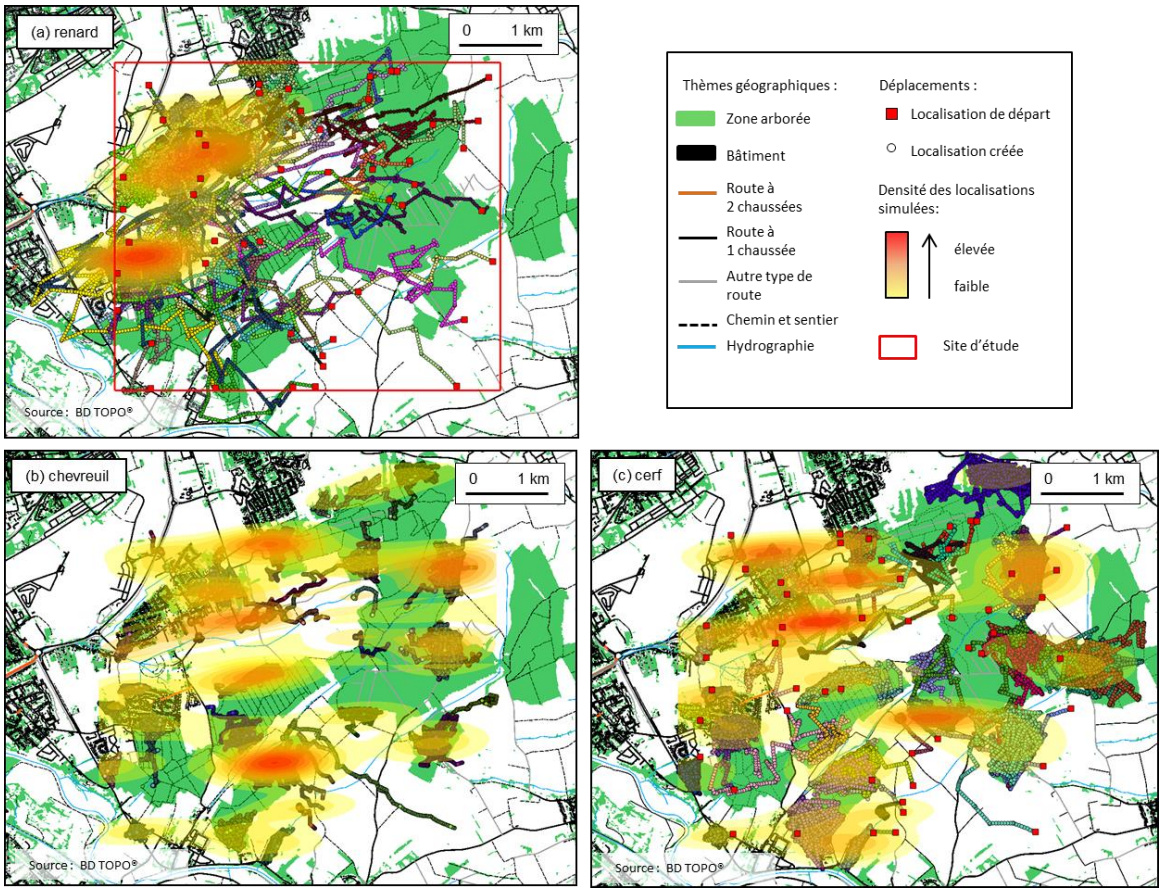


Figure IV.40. Les résultats de simulation par agent pour les trois espèces sur un même site : a) pour le renard, b) pour le chevreuil, c) pour le cerf. L'interpolation par noyaux de la totalité des localisations simulées est cartographiée en superposition afin de visualiser l'intensité de l'utilisation de l'espace.

Nous représentons les trajectoires simulées ainsi qu'une interpolation des localisations correspondantes afin d'estimer leur densité. Cette interpolation est effectuée par la méthode des noyaux, lancée à partir du logiciel R. La cartographie de l'interpolation de la totalité des localisations créées permet de visualiser l'intensité de l'utilisation de l'espace. Nous constatons ainsi une nette différence dans la répartition des localisations créées selon l'espèce à laquelle correspond l'agent. Le renard se distingue par un parcours concentré dans les zones urbanisées : sur le centre de la commune au nord du site et sur la zone résidentielle à l'ouest. Cela correspond en effet aux thèmes des destinations privilégiées dans le modèle. Les trajectoires sont construites de sorte que l'agent choisisse des destinations différenciées les unes des autres. Les simulations pour le renard sous-estiment le parcours des bois alors que le site d'étude est peu urbanisé. Pour les deux espèces de cervidés, les déplacements s'éloignent peu des localisations initiales. Les déplacements s'effectuent à proximité et à l'intérieur des zones

arborées. Toutefois, les espaces parcourus concernent des superficies plus restreintes pour les chevreuils que pour les cerfs, au vu de la vitesse de déplacement qui constitue la seule différence dans cet espace. Une caractérisation quantitative des trajectoires simulées est donnée par les valeurs dans le Tableau IV.11. Elle confirme l'analyse visuelle des résultats.

Tableau IV.11. Les valeurs moyennes calculées pour les 50 trajectoires lancées par espèce sur le même site.

Espèce	Distance totale (km)	% des localisations dans une zone arborée	Nombre de zones arborées parcourues	Moyenne des surfaces des zones arborées parcourues (ha)	Nombre de voies différentes traversées	Distance minimale moyenne aux voies d'accès (m)	Distance minimale moyenne aux bâtiments (m)
renard	27	44	41	4	46	30	115
chevreuil	10	73	3	25	9	64	593
cerf	30	59	4	19	17	77	512

Les remarques sur les résultats de simulation sont les suivantes.
- Tout d'abord, par rapport aux sites d'étude, les distances parcourues sont équivalentes. Les distances parcourues par l'agent de l'espèce chevreuil sont en moyenne de 10 km, ce qui est similaire aux résultats de simulation pour le chevreuil sur le site des Vosges. Ces distances sont également du même ordre de grandeur que celles précédemment étudiés pour les renards (milieu densément urbanisé à Nancy) et les cerfs (milieu forestier dans le Vosges), respectivement de 27 km et de 30 km. Pour les cerfs toutefois, la distance était de 40 km en moyenne sur le site Vosges. Une distance plus faible peut être due à la fragmentation des zones arborées sur ce site alors que le couvert forestier est continu dans les Vosges.

- Sur ce site d'étude, la cohérence entre les distances selon les espèces est conservée : la distance moyenne est plus faible pour le chevreuil. Les valeurs légèrement plus élevées pour le cerf peut être dues au fait qu'il parcourt des zones arborées de plus grandes surfaces que le renard. Le renard va d'une destination à l'autre surtout dans les zones bâties du site. Les destinations choisies sont relativement proches les unes des autres.

- Par rapport aux éléments du paysage, le pourcentage des localisations simulées situées dans une zone arborée, représentant le thème de destination commun pour les trois espèces, suit l'ordre croissant suivant : renard, cerf et chevreuil. Le chevreuil se situe davantage en couvert arboré que le cerf, ce qui est logique car le cerf se déplace sur de plus grandes distances et qu'il est amené à se situer en dehors des zones arborées. Le renard a pour destination également les bâtiments et parcourt la zone urbanisée, ce qui le fait sortir du couvert arboré davantage que les cervidés. Ces résultats sont à mettre en perspective avec le nombre de zones arborées différentes parcourues. Pour le renard, elles sont au nombre de 41 : ce sont des petites zones fragmentées dans les zones urbanisées (moyenne de 4 ha). Elles sont beaucoup moins nombreuses pour les cervidés : 3 pour le chevreuil et 4 pour le cerf. Ces zones arborées correspondant pour la plupart d'entre elles à des bois de taille importante, ont été choisies comme destination par l'agent (en moyenne 25 ha pour le chevreuil et 19 ha pour le cerf). Le parcours des éléments de végétation dans les zones urbanisées est dû à la proximité de certains points initiaux choisis aléatoirement pour ce test.
Les relations spatiales avec les voies de communication sont les suivantes : la distance minimale moyenne avec les voies est de 30 m pour le renard, et de plus du double pour le chevreuil et le cerf. Le nombre de routes traversées est également plus élevé pour le renard. Ces résultats sont cohérents avec la répartition des localisations par rapport à l'occupation du sol, plutôt urbanisée au nord où se trouve le plus souvent l'agent de l'espèce renard et boisée pour le reste du site où

sont plus présents le chevreuil et le cerf (voir l'interpolation des localisations en Figure IV.40). Cette répartition se vérifie via la distance minimale moyenne aux bâtiments qui est environ 5 fois inférieure pour le renard que pour les cervidés.

Nous avons zoomé en Figure IV.41 sur 3 trajectoires simulées pour le renard, le chevreuil et le cerf, à partir de la même localisation initiale. Cette localisation est située dans un bois éloigné des bâtiments et contenant des voies sans ou avec peu de trafic routier.

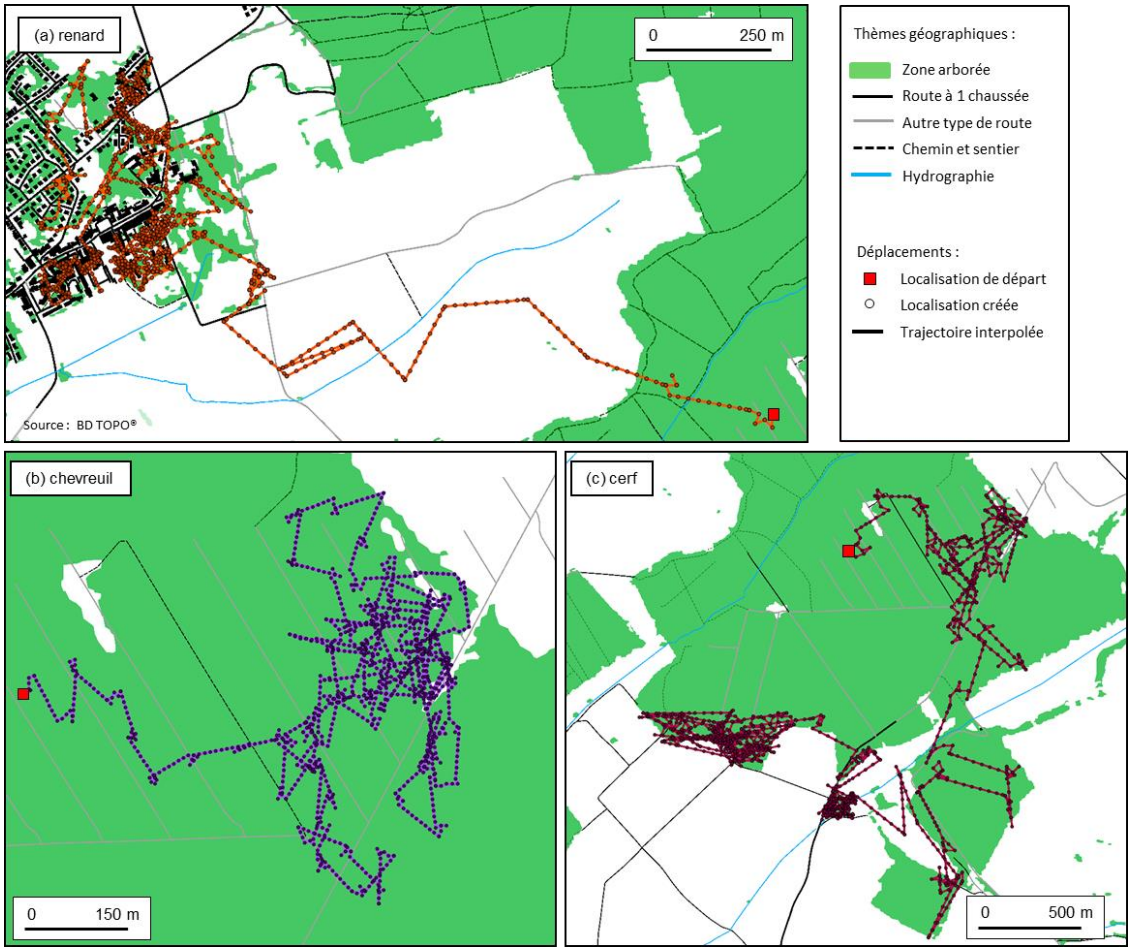


Figure IV.41. Une trajectoire construite pendant 24 h, a) pour un renard, b) un chevreuil et c) un cerf à partir du même point initial.

Les distances parcourues dans ces exemples sont les suivantes : 27,6 km (renard), 10,5 km (chevreuil), 32,5 km (cerf), ce qui correspond aux moyennes des 50 trajectoires lancées sur le site par espèce. Le chevreuil reste dans la zone boisée du point initial, alors que le cerf se déplace dans 5 zones arborées différentes de l'environnement agent. Ce comportement semble cohérent avec la littérature citée en chapitre II sur l'exploitation de l'espace par ces espèces. Bien que vivant majoritairement en milieu forestier, les cerfs fréquentent les clairières, les lisières et les prairies avoisinant les forêts où ils trouvent des essences herbacées (Bouquier, 2003). Le chevreuil peut avoir des domaines vitaux uniquement en forêt, ce qui est représenté par la simulation en Figure IV.41.b. Il peut aussi vivre dans un milieu agricole avec des parcelles boisées, mais ce comportement n'est pas représenté dans notre modèle (cf. suivis des chevreuils par l'INRA à Aurignac). L'exploitation alternée des bois et des prairies et cultures dépend aussi de l'heure de la journée pour les cervidés, ce qui n'est pas représenté par le modèle. Pour la trajectoire du renard, l'agent commence par explorer la zone arborée à proximité de sa

localisation initiale, puis il se dirige rapidement vers la commune au nord. Dans les observations, ce comportement est constaté en période nocturne. La traversée du cours d'eau est réalisée sans contournement. L'agent traverse les routes rencontrées dans un délai inférieur à 10 min selon la valeur du paramètre définie. Sinon il sélectionne une nouvelle destination et s'éloigne de la route. Dans la commune, les déplacements de l'agent sont très contraints par les bâtiments. La trajectoire est donc très sinueuse, ce qui concorde bien avec un comportement de recherche de ressources. En périphérie d'agglomération, il est courant que les renards s'approchent des habitations, surtout la nuit. Les déplacements simulés pour les trois espèces semblent donc cohérents même s'ils sont un peu caricaturaux. Le modèle exagère en effet les comportements de déplacement selon les espèces, mais cela n'empêche pas une lecture de l'espace et de son utilisation par les animaux à partir des résultats de simulation.

Les trajectoires simulées pour les trois espèces animales étudiées semblent assez bien correspondre aux déplacements connus des animaux, même en dehors des sites d'étude sur lesquels nous avions analysé les observations. Cette cohérence concerne :

- les distances parcourues, réalistes pour les trois espèces, même si elles sont plus grandes que celles observées quotidiennement. Ces distances correspondent en tout cas aux résultats obtenus sur les autres sites d'étude ;
- la situation des déplacements simulés par rapport aux éléments du paysage qui dépend des besoins et des préférences de l'espèce. Sur le site commun, le renard parcourt ainsi de manière privilégiée la zone urbanisée. Les chevreuils et les cerfs restent à l'extérieur de cette zone bâtie et préfèrent les bois.

La simulation des déplacements sur un même site permet d'appréhender le parcours de l'espace selon les trois espèces. Le site choisi est peu contraint par de grandes infrastructures de transport formant potentiellement des obstacles. Nous reprenons cet exemple en IV-4 dans la définition de scénarios d'aménagements et afin de tester leurs effets sur les déplacements.

4) ÉVALUATION DES EFFETS DES MODIFICATIONS DE L'ESPACE SUR LES DÉPLACEMENTS SIMULÉS

Les aménagements du territoire provoquent des modifications de l'espace dans lequel vivent les animaux. Les éléments du paysage qui font barrière aux déplacements ont des conséquences sur la mobilité de la faune sauvage, sur les populations animales et sur les écosystèmes auxquels ils participent. Les infrastructures de transport et l'urbanisation entraînent une fragmentation des habitats occupés par les espèces animales. Cette fragmentation diminue la superficie des lieux de vie adaptés pour la faune (Amand *et al.*, 2012), et empêche ou freine la circulation des animaux d'un lieu de vie à un autre (Marsh *et al.*, 2005). Les études d'impact des infrastructures de transport portent sur plusieurs aspects de l'environnement : les changements de la composition du sol, des particules dans l'air, de la répartition des éléments du paysage (Jullien & François, 2006). Ces composantes de l'environnement ont des conséquences sur les animaux. L'évaluation des conséquences des modifications du paysage sur les déplacements des animaux est importante car elle permet de mieux définir l'emplacement optimum des futurs aménagements et leur configuration. Elle permet de proposer des mesures en amont de la mise en place des aménagements pour pallier leurs effets négatifs sur la faune, ainsi que de proposer des aménagements compensatoires à ceux existants. Ces mesures sont prises en compte dans les récentes politiques de définition des continuités écologiques, notamment en France par la politique des trames vertes et bleues (COMOP TVB, 2010). Ces aménagements compensatoires peuvent faciliter la traversée des animaux, comme les passages à faune. Ils peuvent aussi consister à augmenter la proximité et le lien entre des éléments du paysage favorables aux déplacements, par exemple par un agencement des occupations du sol répondant aux besoins des animaux et des structures paysagères les reliant (alignements arborés, haies).

Nous nous appuyons sur le modèle agent défini et testé dans les parties précédentes afin de visualiser les conséquences que peuvent avoir des aménagements sur les déplacements (voir la Figure IV.42).

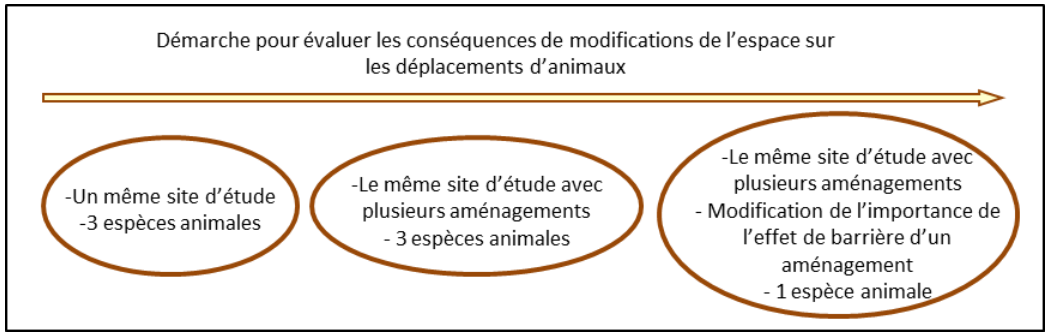


Figure IV.42. Protocole d'évaluation des conséquences des aménagements sur les déplacements d'animaux.

Notre démarche est la suivante.
1) Nous étudions les déplacements simulés pour les trois espèces renard, chevreuil et cerf dans un espace initial.
2) Nous lançons des déplacements sur le même espace et avec le même paramétrage de simulation, mais en ajoutant différents aménagements qui ont soit un effet de barrière soit un rôle favorisant les déplacements. Les résultats avant et après modifications de l'espace sont comparés par espèce.
3) Nous modifions l'importance de l'effet de barrière d'un aménagement afin de voir comment l'aménagement empêche plus ou moins la traversée par les animaux.

Nous définissons plusieurs scénarios d'aménagements que nous présentons en IV-4.1. Les trajectoires construites dans un scénario de référence sont analysées en IV-4.2. Ce scénario servira ensuite lors des comparaisons des résultats de simulation sur le site avec différents aménagements. Les aménagements sont ensuite modélisés et nous évaluons leurs conséquences sur les nouvelles trajectoires simulées. Pour les différents tests de simulation, les comportements des agents utilisés pour l'expérimentation du modèle en IV-3 ne sont pas modifiés. Seul l'environnement agent change avec les modifications du paysage décrites dans les bases de données géographiques.

4.1. Présentation des scénarios d'aménagement

Les types de déplacement

La fragmentation des habitats peut avoir pour conséquence une diminution de l'espace de vie par l'animal, ou bien une migration définitive vers un autre lieu de vie. Les propositions d'aménagements pour traverser des obstacles, comme les passages à faune, ont pour but de rendre possible une adaptation de l'animal à des modifications du paysage pour qu'il puisse continuer à accéder à des sites intéressants pour lui. Dans notre modèle, nous avons intégré la notion d'obstacle aux déplacements. Si un obstacle est ajouté dans l'environnement agent, alors cela a pour conséquence de limiter les déplacements d'un côté ou de l'autre de l'obstacle. Nous souhaitons tester le parcours de l'ensemble du site d'étude et voir où se situent les trajectoires lors de la traversée d'un nouvel obstacle. Les tests de simulation présentés jusqu'à présent dans notre thèse correspondent à une motivation aux déplacements exploratoires. Aucune destination à atteindre n'était fixée. Nous associons à présent dans notre modèle une destination à atteindre pour l'agent, ce qui correspond au paramétrage de la motivation du déplacement « vers une destination fixe ». Cela force l'agent à se déplacer dans une direction et à essayer de traverser l'obstacle pour atteindre sa destination. Une destination fixe place les agents dans une situation un peu extrême où ils sont poussés à traverser des infrastructures de transport. Cela représente une grande contrainte, pouvant être éloignée du cas des déplacements quotidiens des animaux, mais qui nous permet d'évaluer l'effet des infrastructures. L'association d'un lieu d'arrivée à un point de départ peut par ailleurs être reprise si l'on souhaite tester des déplacements sur de longues distances, comme des migrations temporaires ou définitives. Ces migrations sont des étapes nécessaires dans le cycle de vie des animaux. Elles correspondent par exemple à la définition d'un nouveau domaine vital répondant au besoin de l'animal. Les animaux se retrouvent confrontés à des obstacles plus ou moins faciles à traverser lors des migrations. Nous définissons donc une matrice origine-destination (OD) pour les localisations initiales et les destinations de l'agent. L'agent conserve ainsi pendant toute la durée de la simulation l'objectif d'atteindre sa destination. S'il ne l'atteint pas, c'est que les obstacles sont nombreux et importants, et qu'il reste bloqué par ces obstacles en cherchant à les traverser ou à les contourner. Nous testons les déplacements pour les trois espèces – renard, chevreuil et cerf. Les points initiaux de la matrice OD sont les mêmes que les 50 définis en IV-3.5. Les destinations sont 50 points différents définis aléatoirement sur l'ensemble du site d'étude. Bien qu'aléatoires, nous avons vérifié que les origines et les destinations étaient bien réparties sur l'ensemble du site afin que l'agent soit amené à devoir traverser les nouveaux aménagements.

En parallèle des simulations avec des destinations fixées, nous réalisons un deuxième type de test sur l'effet des aménagements avec des déplacements exploratoires. Les déplacements

exploratoires correspondent davantage à des déplacements quotidiens avec des parcours habituels de l'espace par les espèces animales et il n'y a pas de destinations fixes à atteindre. Le fait d'avoir des localisations de départ sans les destinations permet de comparer les trajectoires simulées pendant des durées identiques, contrairement à la situation où une destination doit être atteinte et où la durée change selon la vitesse de déplacement de l'espèce. Nous pouvons ainsi calculer la répartition des déplacements de part et d'autre d'une nouvelle route et identifier si elle empêche des traversées.

Les aménagements testés

Les modifications de l'espace dont nous souhaitons évaluer les conséquences sur les déplacements sont des aménagements avec différents rôles : soit faisant a priori barrière soit favorables au déplacement. Les aménagements testés sont les suivants (cf. Figure IV.43).

- La construction d'une route – scénario 1 et scénario 4 :

Une route est une infrastructure linéaire qui fragmente l'espace et qui, si elle a un effet de barrière important, limite les déplacements d'un côté ou de l'autre de son axe. L'effet de la construction d'une route sur les trajectoires simulées est étudié sur des déplacements vers une destination fixée (scénario 1). Nous lançons ensuite les simulations dans le cas de déplacements exploratoires afin de tenter de quantifier les conséquences de la nouvelle route sur la répartition des trajectoires simulées, sans la contrainte d'une destination fixée forçant les agents à traverser les obstacles. Les simulations sont aussi comparées entre elles selon les différents aménagements décrits dans les scénarios 2 et 3 (ajout de passages à faune, d'un corridor écologique). L'importance de l'effet de barrière de cette route est modulée à partir de la probabilité de traversée de la route par les agents (scénario 4).

- La construction d'une route avec des passages à faune – scénario 2 :

Les passages à faune sont des aménagements mis en place pour permettre aux animaux de traverser des obstacles à des endroits ponctuels. Ces passages sont conçus en fonction des espèces animales visées (voir la photo d'un passage en Figure I.39). La largeur, la présence de végétation, le positionnement aérien ou souterrain sont autant de caractéristiques des passages à faune qui dépendent de l'espèce animale et de l'obstacle (route, voie ferrée, cours d'eau). Si les passages sont bien conçus et situés dans un site fréquenté par les espèces animales visées, ils peuvent être empruntés régulièrement (APRR, 2009).

- La construction d'une route avec des passages à faune accompagnés d'un corridor écologique – scénario 3 :

Les passages à faune sont des aménagements ponctuels et il est souvent avancé que leur intégration dans un réseau écologique plus large est bénéfique au déplacement (COMOP TVB, 2010 ; Bennett, 2003). En effet, les passages à faune peuvent ne pas être utilisés s'ils ne sont pas accessibles par une configuration paysagère favorable, par exemple une continuité dans le couvert arboré. Nous complétons donc les aménagements précédents par un corridor favorisant les déplacements et menant à l'entrée des passages à faune.

La représentation des aménagements décrits dans l'environnement agent est simplifiée, mais nous souhaitons voir si notre modèle permet de répondre aux questions soulevées dans notre thèse. Nous avions en effet comme question de savoir si une modélisation adaptée de l'espace et des déplacements des animaux permet d'évaluer les conséquences des aménagements sur les déplacements. L'objectif est d'estimer en quoi les aménagements contraignent ou dévient les déplacements d'animaux et également de quelle manière faciliter leurs déplacements. Même si

la modélisation des aménagements est simplifiée dans les bases de données géographiques, il est intéressant d'utiliser les données de description de l'espace existantes sur l'ensemble du territoire français. Nous ne représentons pas la description du voisinage proche de la nouvelle route (bas-côtés) et les modifications d'occupation du sol autour de cette route. Pour les passages également, nous ne modélisons pas les caractéristiques de leur construction comme leur largeur ou leur hauteur. Nous nous intéressons aux passages à faune qui permettent une traversée en des points précis des infrastructures, puis au corridor écologique qui permet à l'animal de parcourir facilement un espace en suivant des éléments du paysage favorables au déplacement.

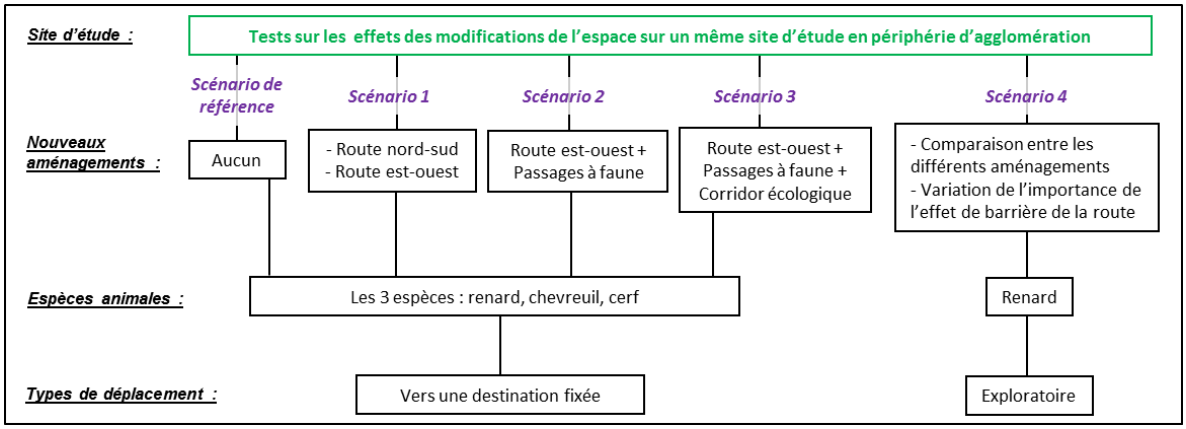


Figure IV.43. Les scénarios d'aménagements du territoire dont les effets sont testés sur les déplacements d'animaux par notre modèle de simulation.

Les paramètres de simulation restent les mêmes que ceux indiqués dans le Tableau IV.10 en IV-3.5. La probabilité de traversée des routes à 1 chaussée, majoritaires sur le site, est de 30 % et on considère que les chemins et les sentiers ne sont pas des obstacles. Pour la nouvelle route, nous souhaitons tester son effet de barrière et nous fixons la probabilité de traversée à 1 %, quelle que soit l'espèce animale. Cette probabilité est relativement faible car elle signifie que l'agent a une chance sur 100 de traverser. Nous ne faisons pas intervenir sa propriété d'audace.

Définition du site d'étude

Comme indiqué en Figure IV.43, nous commençons par évaluer les effets des 3 scénarios d'aménagements pour les trois espèces étudiées. Nous faisons ensuite varier l'importance de l'effet de barrière de la route (scénario 4) et nous analysons les conséquences sur les déplacements du renard. Nous n'avons repris que cette espèce animale car elle est la plus adaptée par rapport aux cervidés à ce site d'étude avec des occupations du sol variées. Les simulations sont lancées sur un même site d'étude en périphérie de l'agglomération de Nancy en Meurthe-et-Moselle, celui-là même qui a été décrit dans la partie IV-3.5 et sur lequel nous avons testé des déplacements exploratoires pour les trois espèces animales. Différents types d'occupation du sol sont ainsi représentés (zone urbanisée, bois). L'espace n'est pas densément bâti, ce qui permet d'ajouter de manière cohérente de nouveaux aménagements.

L'espace tel qu'il est décrit dans les données est un espace non modifié. Il représente notre scénario de référence. Il représente un état qui va nous permettre de comparer les différents scénarios d'aménagements. Nous traduisons les scénarios de modifications de l'espace par la modification des bases de données géographiques utilisées pour l'environnement agent. Nous intégrons la nouvelle route dans la table des routes et des chemins existants en précisant son type dans l'attribut correspondant. Deux tracés de route sont testés. La répartition particulière

des éléments du paysage sur le site permet de le fractionner par un obstacle de manière différente. Les lieux urbanisés sont regroupés au nord et à l'ouest du site. Le premier tracé a une direction nord-sud et sépare les zones urbaines du reste du site majoritairement boisé. Le second tracé est dirigé est-ouest, répartissant d'un côté et de l'autre de la route les deux zones urbaines (centre-ville de la commune et une zone pavillonnaire) et les bois. Seul le second tracé est ensuite conservé pour les tests sur les autres aménagements car il offre une meilleure répartition des éléments du paysage. Nous modélisons les passages à faune par une zone arborée ainsi que par une coupure dans le tracé de la route. Trois passages à faune sont créés dans des lieux différents : proche de la zone pavillonnaire, proche d'un bois, à l'intérieur d'un bois. Ces passages à faune sont proches les uns des autres, de 1 km et de 2,5 km. Les recommandations sur la fréquence des passages par le Sétra (2006) est environ de 2 km pour la grande faune. Leur situation relative n'est pas prise en compte par rapport au coût de leur mise en place. Le corridor écologique est représenté par une succession de zones arborées menant aux passages à faune. Les corridors en pas japonais sont composés d'une suite discontinue d'éléments du paysage faisant relais entre deux types d'habitat favorables aux espèces animales (COMOP TVB, 2010). Nous avons choisi ce type de corridor car dans notre modèle, les agents sélectionnent des destinations au fur et à mesure de leur déplacement. Les différentes zones arborées composant le corridor représentent plusieurs éléments d'intérêt que l'agent peut suivre. Le corridor relie les bords de la route à d'autres zones boisées afin de conserver un couvert arboré continu. La Figure IV.44 est la carte du site d'étude avec les trois nouveaux d'aménagements testés.

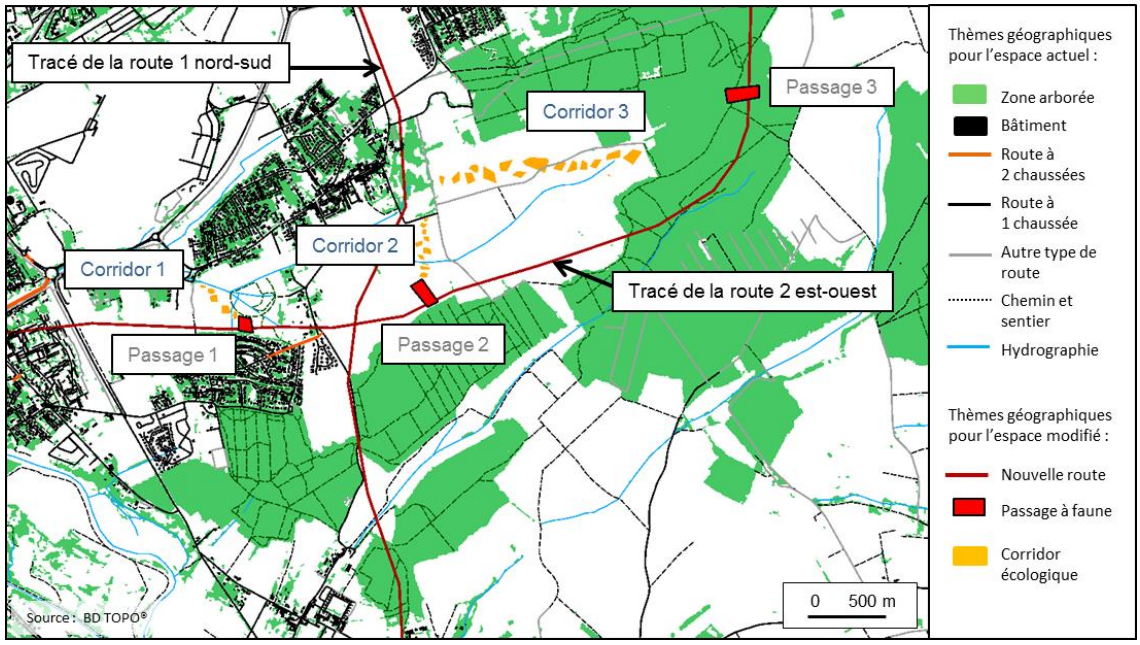


Figure IV.44. Carte du site d'étude avec les différents scénarios d'aménagements. La traduction dans l'environnement agent consiste en la création de nouveaux éléments correspondant à une route et à des zones arborées dans les bases de données géographiques.

L'analyse des résultats de simulation s'effectue par approche qualitative et quantitative. Nous utilisons l'interpolation par noyaux afin de visualiser la densité des points et d'identifier les zones fortement fréquentées de celles qui le sont moins. Pour le test sur l'importance de l'influence du rôle de barrière de la route, nous calculons un indice afin de représenter quels sont les effets sur les trajectoires simulées.

4.2. Le scénario de référence : les simulations de déplacements vers des destinations fixées sur un espace non modifié

Nous lançons à présent la simulation des déplacements vers des destinations fixées, aléatoirement réparties, afin de visualiser les trajectoires construites par l'agent pour relier une localisation initiale à un point final. La matrice OD (origine-destination) est représentée en Figure IV.45. Un agent, correspondant alternativement aux trois espèces animales, construit une trajectoire entre une origine et sa destination correspondante. La construction de la trajectoire s'interrompt lorsque la destination est atteinte à moins de 5 m. Une durée maximale de construction d'une trajectoire par notre modèle est fixée à 20 minutes même si la destination n'est pas atteinte, afin de limiter le test à un temps raisonnable. La durée maximale du test par agent pour la matrice OD ne peut ainsi pas mobiliser le module de simulation pendant plus de 17 heures. Pour l'agent, cela signifie qu'il a environ 7 jours pour atteindre sa destination car la durée de 20 minutes correspond environ à la construction de 10 000 localisations.

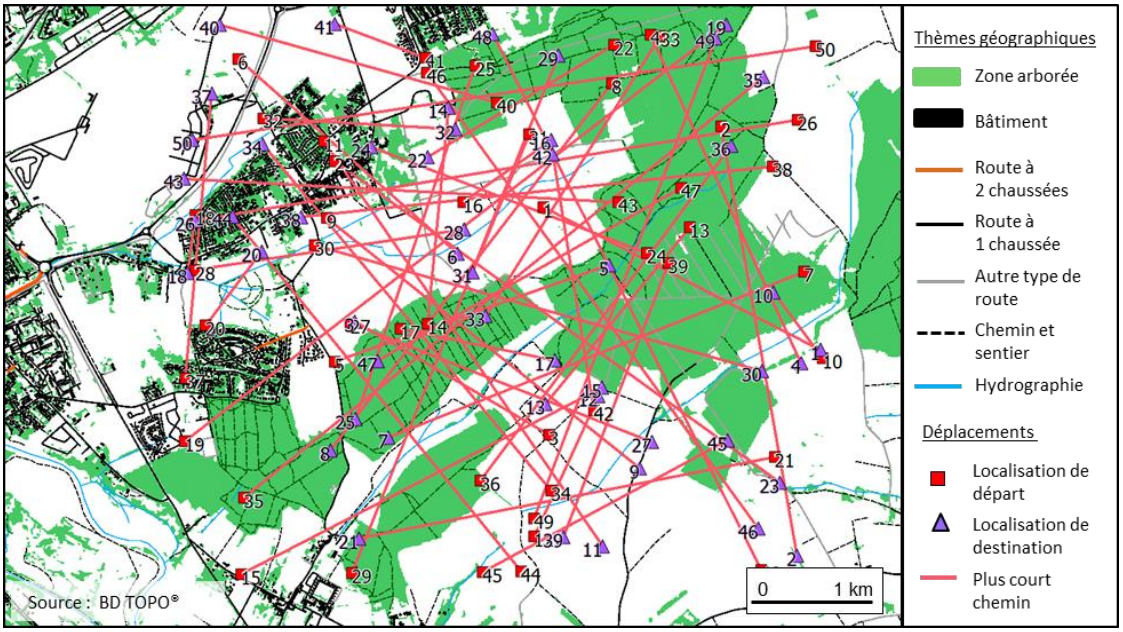


Figure IV.45. Répartition des 50 couples de points de la matrice origine-destination. Les lignes relient les origines correspondant à leurs destinations notées avec un numéro identique.

Les distances euclidiennes correspondant aux lignes droites symbolisées en Figure IV.45 entre les origines et les destinations, sont en moyenne égales à 2,3 km (écart-type de 1, minimum égal à 0,4 km et maximum à 4,5 km). Ces lignes droites représentent les plus courts chemins entre chaque couple origine-destination. Elles seraient les trajectoires construites par l'agent si l'espace n'était pas contraint. Les distances parcourues par un agent sont logiquement plus grandes que les distances linéaires car l'espace contient des obstacles au déplacement (sur le site : bâtiments, routes, cours d'eau) et des lieux d'intérêt (zones arborées). Pour chaque espèce, l'agent arrive à atteindre sa destination dans la durée impartie (moins de 7 jours), sauf dans 5 % des cas où il prend plus de temps pour parcourir des lieux avant de se rediriger vers sa destination fixée. Les résultats des simulations sont illustrés en Figure IV.46. Les résultats de simulation sont différents de ceux illustrés en Figure IV.40 pour les déplacements exploratoires. Pour les cervidés notamment, les déplacements s'effectuent dans des espaces moins restreints que dans le cas des déplacements exploratoires. Les destinations fixées orientent les trajectoires vers des lieux que les agents auraient moins parcourus, comme les zones urbanisées.

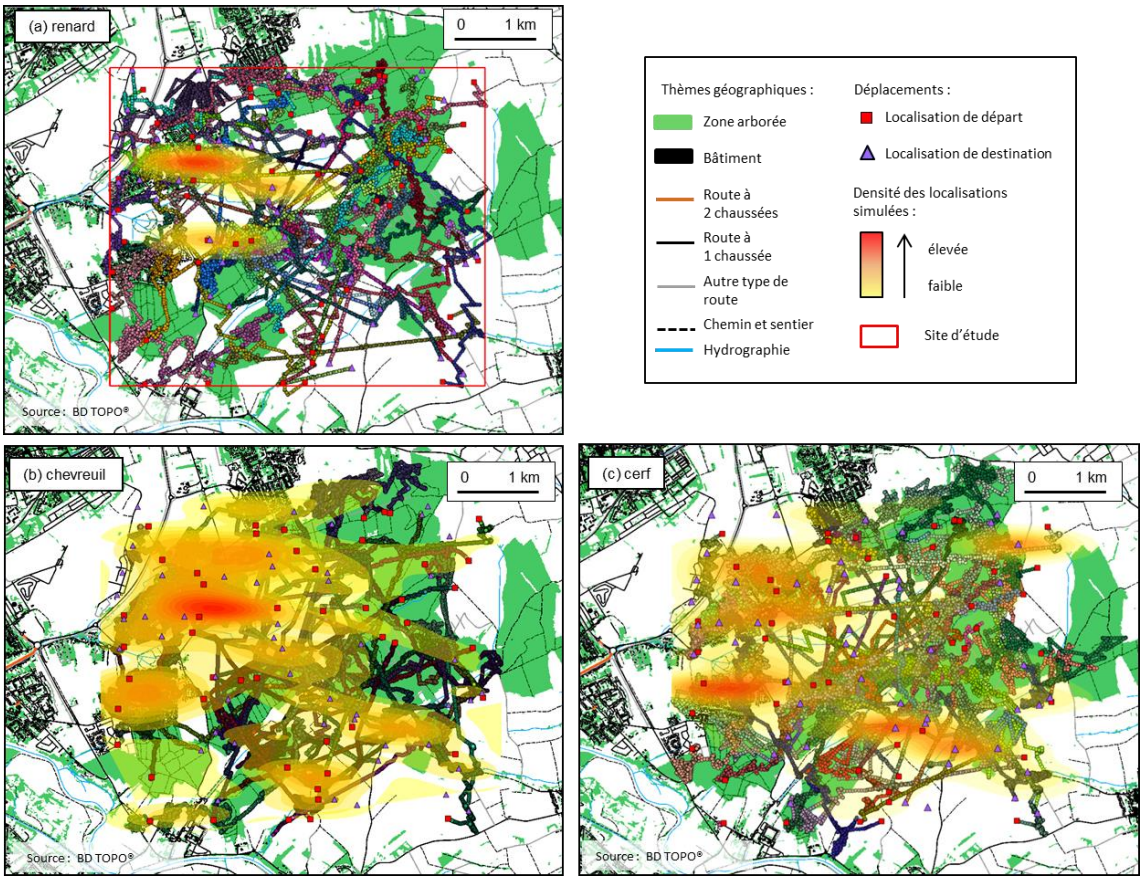


Figure IV.46. Les résultats de simulation pour les trois espèces pour une matrice origine-destination par un agent correspondant à : a) un renard, b) un chevreuil, c) un cerf. Cartographie des localisations et de leur densité par une interpolation par noyaux.

Un agent met en moyenne 11 heures pour atteindre la destination fixée, si c'est un renard, un peu plus de 2 jours si c'est un chevreuil, et 1 journée si c'est un cerf. Ces durées sont cohérentes avec les vitesses moyennes de déplacement intégrées dans le modèle (respectivement par espèce 2,2, 0,35 et 0,45 km/h), et avec les distances parcourues. Les durées et les distances ne sont pas strictement proportionnelles aux vitesses moyennes car la construction des trajectoires ne dépend pas que de ce paramètre. Le renard est plus rapide à se déplacer. Sur ce type d'espace, entre urbanisé et boisé, son comportement généraliste fait qu'il est plus à l'aise pour se déplacer dans plusieurs types de milieu. Le chevreuil et le cerf sont par contre attachés à des habitats peu urbanisés : il est donc réaliste qu'ils mettent plus de temps pour atteindre des destinations qui leurs font parcourir différents types d'occupations du sol. Les caractéristiques des trajectoires simulées sont indiquées dans le Tableau IV.12.

Tableau IV.12. Les valeurs moyennes calculées pour les trajectoires simulées par espèce animale pour une matrice origine-destination identique.

Espèce	Distance totale (km)	% des localisations dans une zone arborée	Nombre de zones arborées parcourues	Moyenne des surfaces des zones arborées parcourues (ha)	Nombre de voies traversées	Distance minimale moyenne aux voies d'accès (m)	Distance minimale moyenne aux bâtiments (m)
renard	24	44	12	17	42	68	535
chevreuil	27	54	15	13	49	74	497
cerf	19	45	11	17	42	68	509

Les destinations fixées ont tendance à rendre plus similaires les résultats des simulations pour les 3 espèces animales par rapport aux déplacements exploratoires (résultats du Tableau IV.11). Les distances totales parcourues sont un peu plus élevées pour les cervidés que pour le renard. Chevreuil et cerf empruntent des chemins moins directs que les renards : ils utilisent davantage des zones arborées qui sont des éléments du paysage d'intérêt et pouvant jouer le rôle de lieux de passage (voir les exemples de trajectoires en Figure IV.47). Le renard sélectionne des destinations, intermédiaires, bâties ou zones arborées, ce qui fait qu'il parcourt plus facilement l'espace car il a plus de choix. Il effectue moins de détours que les cervidés. Le cerf parcourt des distances plus longues que le chevreuil, car sa vitesse est plus élevée. Lorsqu'il parcourt une destination intermédiaire (pendant la même durée que le chevreuil), il augmente d'autant plus sa trajectoire. En comparaison avec le test des trajectoires simulées sans destinations fixées présenté en IV-3.5, on constate surtout une différence pour le chevreuil qui parcourt dans le cas de destinations fixées des distances plus élevées (27 km en 2 jours contre 10 km en 24 h). Le chevreuil a en effet un domaine vital restreint et le déplacement vers une destination fixée correspond à des déplacements de migration ou d'exploration exceptionnels. Pour le renard, les distances parcourues sont équivalentes mais pour une durée deux fois moins longue vers les destinations fixées qui accélèrent leur parcours sur le site d'étude. Le cerf présente par contre peu de différence entre les deux tests, sauf dans la forme des trajectoires qui sont plus dirigées dans le test avec les destinations fixées.

Concernant les relations entre les trajectoires simulées et les éléments du paysage, elles sont globalement plus similaires entre les trois espèces que dans le test sur les déplacements exploratoires. Les cervidés sont amenés à s'éloigner des zones arborées habituellement parcourues afin de pouvoir rejoindre la destination fixée. Ceci a pour effet de diminuer leur présence dans les zones arborées (54 % et 45 % des localisations respectivement pour le chevreuil et pour le cerf) par rapport aux simulations de déplacements exploratoires (73 % et 59 % pour le chevreuil et pour le cerf respectivement). Le nombre de zones arborées parcourues par rapport au test sans destination fixée est 5 fois plus élevé pour le chevreuil et 2 fois plus pour le cerf. Pour le renard, le nombre de zones arborées parcourues est 4 fois moins élevé pour la matrice OD. Le pourcentage des localisations dans les zones arborées reste par contre du même ordre de grandeur avec ou sans destinations fixées. Ceci s'explique par le fait que le renard va atteindre plus rapidement sa destination – grâce à sa vitesse – et plus directement – car il se déplace plus facilement en dehors des éléments du paysage arborés. Les surfaces des zones arborées parcourues sont comprises entre 13 et 17 ha pour les trois espèces, alors qu'elles étaient entre 4 et 25 ha dans le scénario des déplacements exploratoires. Les destinations fixées ont pour effet d'éloigner le renard des zones urbanisées dans lesquelles se situent les petites zones arborées.
Le nombre de voies traversées est compris entre 42 et 49, valeur équivalente au test de déplacement exploratoire pour le renard, mais 5 fois plus pour le chevreuil et 2 fois plus pour le cerf. Les distances minimales moyennes aux routes sont plus élevées pour le renard comparativement aux cervidés dans le cas des déplacements vers une destination fixée. Compte-tenu de la répartition des points de la matrice OD et de la répartition inégale en type d'éléments du paysage sur le site, les déplacements vers une destination fixée se font relativement moins souvent en zone urbanisée où la densité des routes est plus grande.
Les distances minimales moyennes aux bâtiments changent par contre davantage pour le renard que pour les cervidés. Elle est de 535 m ici alors qu'elle est de 115 m dans le cas des déplacements exploratoires. Les destinations intermédiaires que représentent les bâtiments sont moins exploitées par le renard lors de déplacements dirigés, surtout dans le cas où l'espace entre l'origine et la destination comprend peu ou pas de zones urbanisées.

Lorsque les espèces ont une destination précise à atteindre, elles empruntent des lieux qu'elles n'auraient habituellement pas parcourus. Cela a tendance à rapprocher les formes des trajectoires entre les espèces animales, par rapport à des déplacements de type quotidien qui correspondent à des contraintes moins grandes sur les objectifs des animaux (ils ne sont pas obligés d'atteindre un point précis) et les chemins à suivre (ils peuvent modifier plus largement la direction suivie et adapter davantage leur comportement aux éléments du paysage à proximité). Il faut noter aussi que les destinations fixées ne sont pas forcément réalistes pour les trois espèces, ce qui se traduit dans les résultats. Le renard se déplace habituellement en milieu urbanisé et boisé, alors que les cervidés restent normalement loin des zones urbaines. Nous modélisons en effet par la matrice OD des déplacements forcés qui représentent une nécessité, par exemple, suite à un changement dans l'espace de vie initial.

En Figure IV.47, nous avons extrait une trajectoire entre un couple origine-destination identique entre les trois espèces. Le trajet à vol d'oiseau mesure 1,9 km. La trajectoire du renard est la plus proche de la ligne droite. Les trajectoires simulées mesurent 3 km pour le renard, 7 km pour le chevreuil et 5 km pour le cerf. Les localisations construites sont situées respectivement pour les trois espèces à 44 %, 55 % et 35 % dans les zones arborées. Le nombre de voies traversées est moindre pour le renard (8) que pour le chevreuil (19) et le cerf (22). Les voies traversées sont des chemins et des routes non goudronnées.

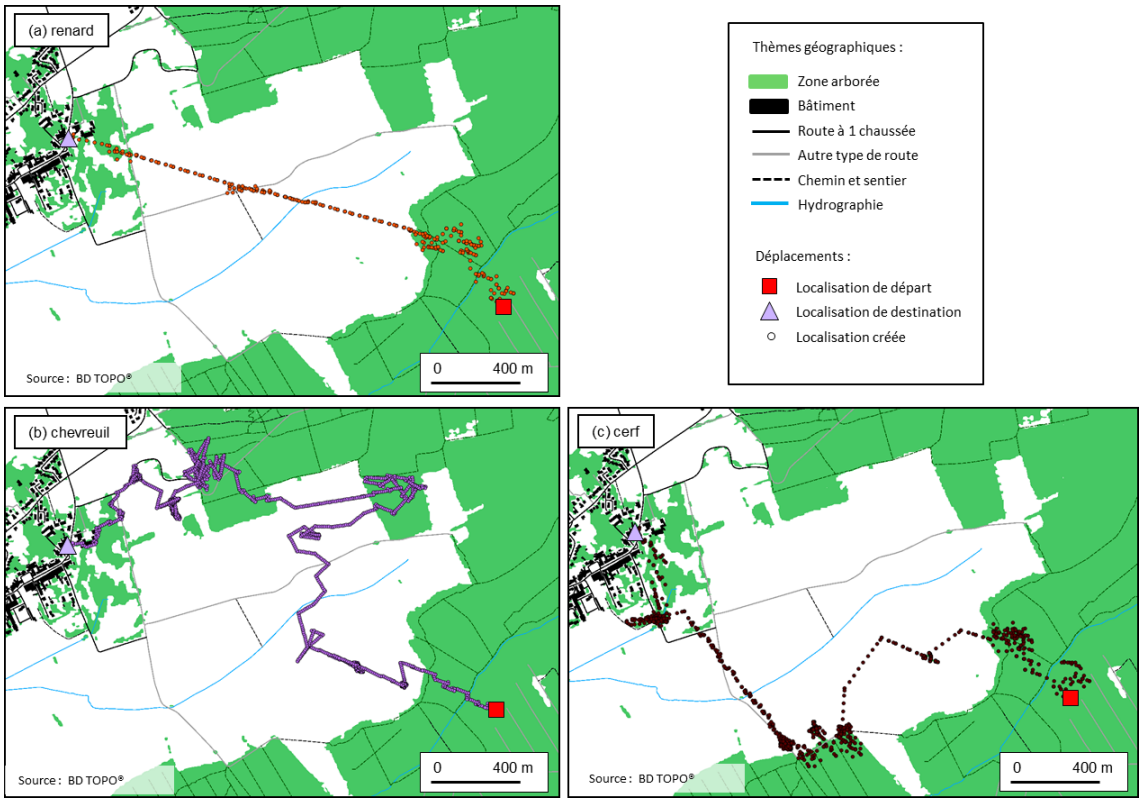


Figure IV.47. Pour une même origine-destination, les trajectoires sont construites pour les trois espèces : a) un renard, b) un chevreuil, c) un cerf.

La trajectoire en Figure IV.47 comporte peu de lieux de passage identifiés pour le renard. Le chevreuil contourne la zone de prairies et de culture (centre de la carte) par les zones arborées au nord. Le cerf contourne cette même zone par le sud en longeant également un bois. Les déplacements en ligne droite ne sont toutefois pas des comportements réalistes, que ce soit pour le renard sur une distance de plus de 1 km ou pour les cervidés sur de plus petites distances

entre les destinations. Cependant, ces déplacements paraissent cohérents au vu du comportement généraliste du renard qui se dirigerait plus facilement dans différents types de milieux. Les simulations lancées sur le site d'étude non modifié nous ont permis de visualiser la forme des trajectoires et les lieux empruntés dans le cadre de déplacements avec des destinations fixées.

4.3. Les scénarios d'aménagements pour des déplacements vers des destinations fixées

Les effets des aménagements sont évalués sur le même site d'étude et à partir de la matrice origine-destination de la Figure IV.45 du scénario de référence. La Figure IV.48 est une cartographie des trajectoires simulées et de leur densité par interpolation de leurs localisations, selon les 3 premiers scénarios d'aménagements. L'exemple est pris pour l'agent correspondant à un renard. Les cartographies pour le chevreuil et le cerf sont en Annexe 11.

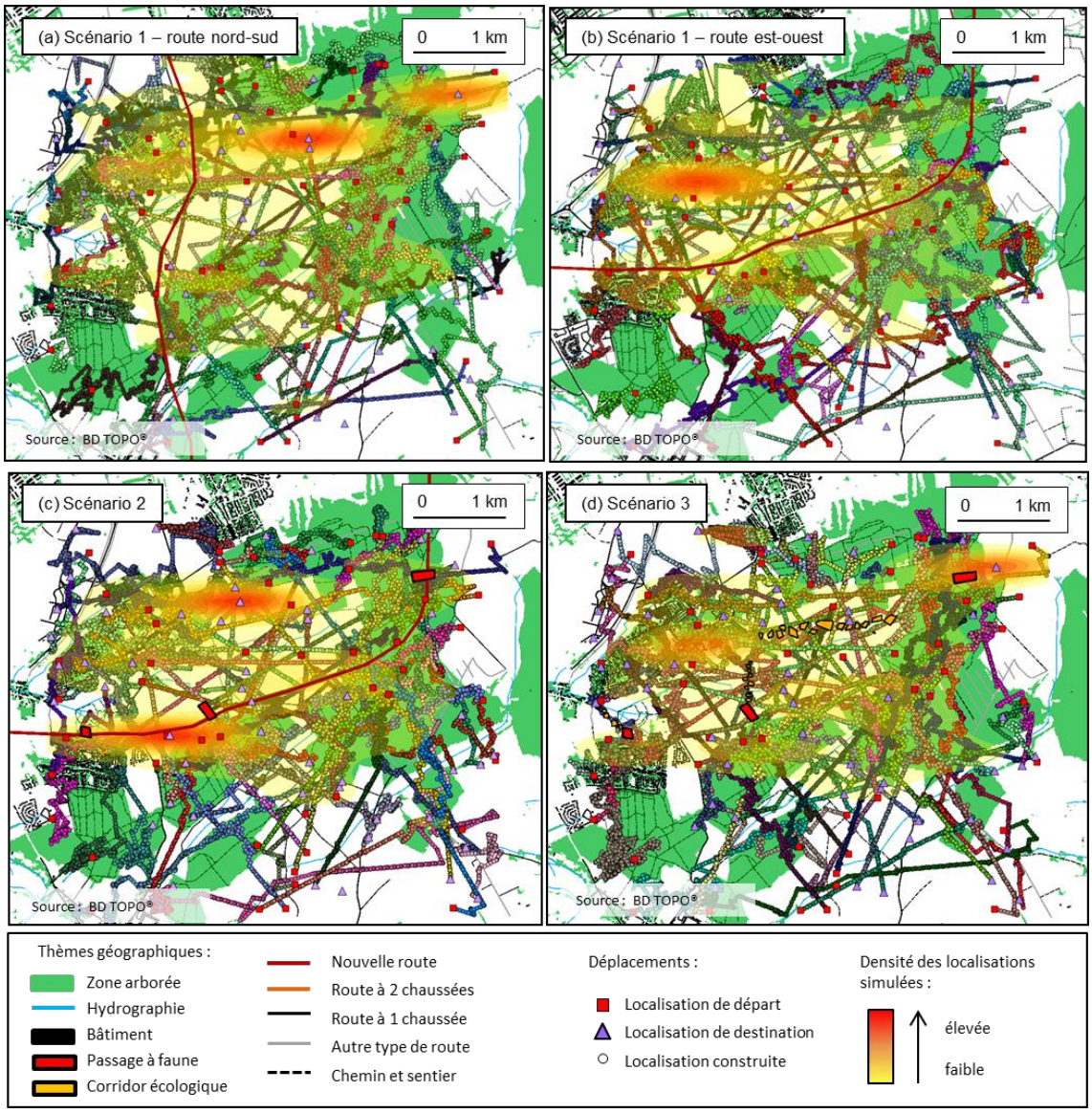


Figure IV.48. Cartographie des 3 scénarios d'aménagements (un correspondant à 2 tracés de route) et de leur effet sur les résultats de simulation pour le renard : a) une nouvelle route de tracé nord-sud, b) une route de tracé est-ouest, c) une route et 3 passages à faune, d) une route, 3 passages à faune et un corridor écologique.

Certaines tendances sur les trajectoires ressortent selon les aménagements. Nous effectuons d'abord une analyse qualitative de l'importance de fréquentation des lieux du site d'étude à partir de la densité des localisations créées, puis nous étudions la forme des trajectoires et les relations aux éléments du paysage. Nous rappelons que la probabilité de traversée de la nouvelle route est de 1 %, ce qui est faible. Comme l'agent a une destination précise à atteindre et que cela force le parcours du site d'étude et la rencontre avec des obstacles, nous pouvons déterminer si l'on arrive à voir des effets des aménagements par notre modèle de simulation. Par rapport à la matrice OD (origine-destination), la route nord-sud croise 27 lignes origine-destination sur les 50 et la route est-ouest en croise 23. Nous regardons comment les routes puis les aménagements ont un effet sur l'agent qui doit traverser ces routes pour atteindre leur destination. Nous regardons également si ces aménagements ont un effet sur les autres parcours origine-destination qui n'ont pas besoin de traverser la nouvelle route.

Analyse qualitative des effets des aménagements

Nous regardons la répartition des trajectoires simulées selon les scénarios d'aménagements et par rapport à celle du scénario de référence (carte en Figure IV.46.a).

- Effets de la construction d'une nouvelle route selon deux tracés différents – scénario 1 :

Par rapport au scénario de référence qu'est l'espace non modifié représenté en Figure IV.46.a, les deux tracés de route ont des conséquences différentes sur les trajectoires. Nous remarquons d'abord que les déplacements sont moins concentrés dans les zones urbanisées que lorsqu'il n'y a pas de nouvelle route. Pour la route nord-sud (Figure IV.48.a), les localisations sont plus également réparties sur l'ensemble du site. Les grandes densités de localisations sont décalées vers l'est, c'est-à-dire vers les zones boisées. Les zones urbanisées sont toujours parcourues mais dans une moindre mesure par rapport à l'espace non modifié. Dans le cas de la route est-ouest (Figure IV.48.b), les zones urbanisées sont un peu plus parcourues que dans le cas précédent mais les localisations sont aussi réparties dans les zones boisées. Nous voyons nettement dans ce scénario se dessiner un regroupement de points le long du tracé de la route. Le tracé nord-sud de la nouvelle route effectue une séparation entre les zones urbanisées à l'est et les grands bois à l'est. Ce tracé divise l'espace en deux parties de superficie inégale. L'effet de barrière est du coup peu visible le long de la route, mais il se traduit par un faible parcours des zones urbanisées qui contiennent pourtant des éléments d'intérêt pour le renard.
Pour le chevreuil et le cerf, l'effet de barrière se visualise également le long de la route est-ouest, davantage que le long de la route nord-sud. Avec ce dernier tracé, il apparaît que l'agent, correspondant aux deux espèces, se retrouve un peu bloqué par la route dans les zones urbanisées. Cela traduit la diminution de l'espace parcouru avec l'apparition d'un obstacle linéaire.

- Effets de la construction d'une route avec des passages à faune – scénario 2 :

Dans le cas de la route est-ouest et des 3 passages à faune (Figure IV.48.c), la répartition est proche de celle sans passage à faune. Les grandes densités de points sont situées entre la zone urbaine au nord et le bois, ainsi qu'à proximité de la nouvelle route. Une concentration de points est aussi observée autour de la route.
Pour les cervidés, nous remarquons également peu de différence entre le scénario avec ou sans passages à faune. Pour le cerf, nous notons toutefois que de nombreux déplacements ont lieu dans le sud-est du site où sont présents les bois : il se déplace dans les zones arborées sur de plus grandes distances que les chevreuils, comme mentionné dans le scénario de référence.

- Effet de la construction d'une route avec des passages à faune accompagnés d'un corridor écologique – scénario 3 :

Pour le scénario avec l'aménagement d'un corridor écologique (Figure IV.48.d), les trajectoires simulées semblent réparties plus également sur l'ensemble du site. Les concentrations se situent dans la zone urbanisée au nord mais dans une moindre mesure que dans les cas précédents. Les localisations sont aussi situées dans l'espace entre les bois et la commune au nord. Pour les chevreuils et les cerfs, nous remarquons nettement lors de l'aménagement de corridor une augmentation des déplacements dans la zone autour de ce corridor, entre le centre-ville de la commune et les bois au sud et à l'est. La route semble séparer le site selon son tracé. Le corridor amène des éléments d'intérêt supplémentaires et donc des lieux de passage. Il paraît ainsi augmenter la circulation des animaux.

Analyse des effets des aménagements par l'étude de la forme des trajectoires et des relations au paysage

Les caractéristiques des trajectoires et les indices sur les relations entre trajectoires et éléments du paysage sont présentés dans le Tableau IV.13.

Tableau IV.13. Les valeurs moyennes calculées pour les trajectoires lancées par espèce pour une matrice origine-destination identique. Les trois scénarios d'aménagements testés sont indiqués.

espèces	Distance totale (km)	% des localisations dans une zone arborée	Nombre de zones arborées parcourues	Moyenne des surfaces des zones arborées parcourues (ha)	Nombre de voies traversées autre que la nouvelle route	Distance minimale moyenne aux voies (m)	Distance minimale moyenne aux bâtiments (m)
Scénario 1 - route est-ouest							
renard	14	45	9	19	32	60	539
chevreuil	22	54	13	15	38	59	488
cerf	30	44	11	16	37	60	489
Scénario 2 - route + passages							
renard	19	43	10	19	36	58	570
chevreuil	20	53	12	14	33	61	478
cerf	37	51	11	17	40	61	506
Scénario 3 - route + passages + corridor							
renard	16	47	10	17	31	63	578
chevreuil	23	55	14	14	36	66	480
cerf	33	47	14	13	41	62	466

Nous avons appliqué le test de Mann-Whitney entre les trois scénarios par une comparaison deux à deux, pour chaque espèce séparément. Nous rappelons que ce test, déjà utilisé lors des analyses de données dans le chapitre III, permet d'identifier si deux séries de valeurs sont différentes de manière significative au niveau de leur moyenne. Par exemple dans ce test, nous testons si la distance moyenne totale des 50 trajectoires lancées à partir de la matrice OD pour le renard est significativement différente entre le scénario de référence et le scénario de la route seule, puis entre le scénario de la route seule et le scénario de la route et des passages. Les différences entre le scénario de référence et les scénarios d'aménagements, ainsi que les différences entre les différents scénarios d'aménagements ne sont pas significatifs. Cette absence de relation laisse supposer que le test nécessiterait de relancer plusieurs fois les simulations à partir de la matrice OD. Cela peut aussi supposer que les aménagements modélisés

en faveur des déplacements (passages ou passages + corridor) ont peu d'effets sur les simulations. Nous pouvons formuler néanmoins quelques remarques sur les valeurs du tableau, notamment par rapport au scénario de référence.

Les distances totales parcourues varient un peu entre le scénario de référence (Tableau IV.12) et les scénarios d'aménagements de manière générale. Par exemple pour le renard, la distance totale moyenne est de 14 km dans le scénario de la nouvelle route seule alors qu'elle est de 24 km pour le scénario de référence, ce qui peut quand même indiquer que la route restreint les déplacements. Avec les passages à faune et le corridor, elle est respectivement de 19 km et de 16 km. Les distances sont modifiées également pour le chevreuil (22 km avec la nouvelle route contre 27 km sans la route) alors que pour le cerf, celles-ci restent similaires (30 km). Il est difficile de pouvoir conclure à partir de ces différences. Au niveau de la durée moyenne de déplacement de l'agent pour parcourir les origines-destinations, elle reste du même ordre de grandeur dans les scénarios avec ou sans nouveaux aménagements. Nous pouvons juste émettre l'hypothèse qu'une diminution après l'ajout de la route des distances vient du fait que le renard se retrouve coincé par la route. S'il ne peut la traverser, il la longe jusqu'à ce qu'il trouve un endroit favorable pour traverser (élément d'intérêt) et que la probabilité de traversée lui permette de le faire. Nous avions vu cet aspect dans la critique de nos algorithmes et dans la proposition d'amélioration du réalisme des déplacements face à un obstacle : l'animal ne longerait pas automatiquement cet obstacle mais il s'en éloignerait et essaierait de traverser régulièrement à différents endroits. Le comportement de longer la route peut cependant être cohérent avec la réalité. En effet, un passage à faune est souvent accompagné de dispositifs qui conduisent les animaux vers son emplacement, comme des grillages pour la grande faune. Les animaux peuvent alors longer le grillage par exploration et aboutir au passage.

La présence de l'agent dans le couvert arboré est peu modifiée quelle que soit l'espèce animale et quel que soit le scénario. Les pourcentages des localisations incluses dans les zones arborées restent autour de 50 %. Les caractéristiques des zones arborées parcourues évoluent peu également. Les surfaces de ces zones arborées ont toutefois tendance à diminuer dans le scénario du corridor écologique, par exemple pour le cerf la moyenne est de 13 ha alors qu'elle est de 17 ha dans l'espace non modifié. Cela peut en partie être dû à une utilisation des zones arborées qui constituent le corridor écologique et qui sont de petite superficie. L'utilisation des passages à faune diffère peu entre les espèces. Chaque passage à faune est utilisé en moyenne par l'agent de chaque espèce, lors de 2 ou 3 traversées de la route est-ouest. Ceci correspond en moyenne par espèce à une somme de 8 trajectoires sur les 27 qui doivent traverser la route, soit environ 30 %, ce qui est assez élevé. La probabilité de traversée est fixée à 1 %, qui est une valeur faible. Cependant, l'agent conserve l'objectif d'atteindre sa destination, ce qui le pousse à traverser. Les passages à faune et le corridor écologique n'ont pas d'influence sur le nombre de traversées. Il met plus longtemps à traverser et il franchit la route à un autre endroit que dans le cas où la route n'a aucun rôle d'obstacle. L'effet de barrière se traduit par une orientation forcée des déplacements et une différence de répartition dans l'espace des trajectoires. Pour le corridor écologique réparti en 3 ensembles à partir des 3 passages à faune, on remarque une différence pour le chevreuil qui l'utilise dans 23 trajectoires, et le renard et le cerf qui l'utilisent tous les deux dans 15. Le chevreuil correspond en effet au comportement agent qui se déplace le moins vite. Il se déplace de manière plus prononcée de proche en proche dans les éléments arborés du corridor.
Le nombre de voies traversées diminue pour toutes les espèces entre l'espace de référence et l'espace modifié avec la nouvelle route (scénario 1) ainsi que pour les 2 autres scénarios. Si les déplacements sont en effet freinés par la route, les traversées de voies sont réduites car

pendant une même durée, l'agent cherche à traverser la nouvelle route et ne parcourt pas d'autres endroits. Nous avons vu que les déplacements représentent des distances plus petites. Ils sont concentrés dans des surfaces plus petites, notamment autour de la route. L'effet de barrière est ici traduit par une limitation dans les déplacements, visible sur la cartographie en Figure IV.49 notamment autour de la route.
Les distances minimales moyennes aux routes et aux bâtis ne suivent pas un profil particulier par espèce ou selon les scénarios. Toutes diminuent cependant par espèce entre l'espace de référence et l'espace avec une route (pour le renard de 68 km à 60 km, pour le chevreuil de 74 km à 59 km et pour le cerf de 68 km à 60 km). Les distances aux routes restent de manière générale autour de 60 km dans les scénarios 2 et 3.

Concernant la comparaison entre les 2 tracés de la nouvelle route du scénario 1 (nord-sud et est-ouest), les agents se tiennent globalement plus éloignés de la route de tracé nord-sud que de tracé est-ouest avec ou sans aménagement en faveur de la faune. Cela peut s'expliquer car dans le cas du tracé nord-sud, les déplacements s'effectuent beaucoup entre les zones boisées à l'est de la route et séparément entre les zones urbaines à l'ouest. Il y a 23 traversées de la route nord-sud dans le scénario 1, sur les 23 origines-destinations qui traversent cette route. La route nord-sud accentue la séparation entre les zones bâties et les bois. L'agent a tendance à se concentrer d'un côté ou de l'autre de la route. Le bâti et la végétation arborée sont plus également répartis dans le cas de la route de tracé est-ouest : il y a plus d'échanges entre les bois et les zones habitées. 29 traversées de la route sont réalisées sur 27, car l'agent traverse dans un cas 3 fois la route au lieu d'une.

La nouvelle route limite les déplacements en dirigeant l'agent le long de son axe le temps qu'il trouve un endroit pour traverser. Elle les redirige potentiellement vers d'autres lieux du site d'étude, différents de ceux dans le scénario de référence. En Figure IV.49, nous avons zoomé sur deux trajectoires construites pour les renards.

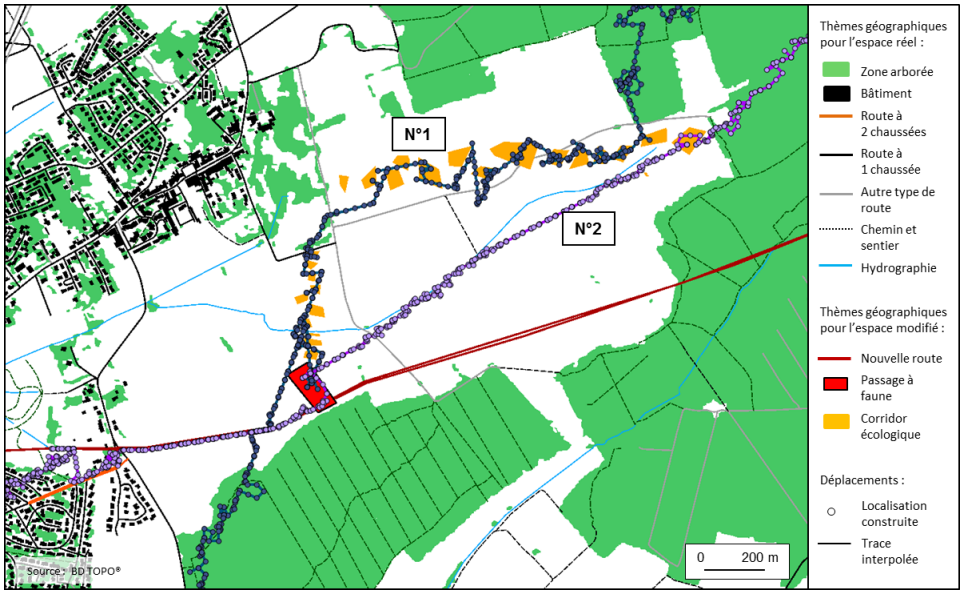


Figure IV.49. Extrait de deux trajectoires construites pour un renard dans le scénario d'aménagement de la route est-ouest accompagnée des passages à faune et d'un corridor écologique.

La trajectoire n° 1 a un point initial au nord et la direction prise par l'agent est le sud : les déplacements s'effectuent en empruntant les zones arborées du corridor écologique. À proximité de la route, un retour en arrière est constaté et sa traversée est réalisée légèrement à

l'écart du passage à faune. Le corridor mène dans ce cas les déplacements vers des lieux de traversée et facilite la traversée du site en dehors de la végétation arborée ; aucune zone urbaine n'est approchée. La durée du déplacement entre l'origine et la destination est de 15 heures pour une distance de 3 km à vol d'oiseau. La trajectoire n° 2 commence au sud-ouest du site et se termine au nord-est. Sa durée correspond à 3 jours, ce qui est long pour rejoindre la destination à 4,5 km de l'origine. L'agent est ralenti car il parcourt une zone densément urbanisée après son point de départ. L'agent est arrêté par la route. Il la longe alors sur environ 1 km avant de la traverser au niveau du passage à faune. Il n'emprunte pas le corridor écologique mais il se dirige vers une zone boisée sans rencontrer d'obstacle et sans effectuer de déviation. Ces deux exemples montrent une utilisation ponctuelle du passage et une utilisation du corridor pour atteindre des destinations définies.

Le nombre de trajectoires simulées reste limité, mais nous pouvons formuler quelques remarques de comparaison entre les scénarios d'aménagements et celui de référence. Les résultats de simulation avant les aménagements paraissent cohérents pour des déplacements vers des destinations fixées. Le renard se déplace rapidement et plus directement (distance de la trajectoire moins grande). Le cerf se déplace rapidement et fait des détours vers des zones arborées qu'il parcourt largement. Le chevreuil se déplace plus lentement et sur de petites distances notamment dans les zones arborées. Après la construction de la nouvelle route, nous pouvons observer l'effet de barrière sur les trajectoires notamment celles qui traversent son axe. Cet effet de barrière est dépendant de la probabilité que nous avons attribuée à la route qui est de faible valeur (1 %). Cela nous permet de voir l'effet des aménagements en faveur de la faune. Les simulations nous amènent à émettre l'hypothèse que l'aménagement du corridor écologique a plus d'influence sur les déplacements que l'aménagement des seuls passages à faune.
L'analyse des scénarios nous font formuler quelques pistes pour l'amélioration de la prise en compte des comportements d'animaux ainsi que de l'espace. Pour les comportements d'animaux, notre modèle traduit le fait que le renard est une espèce plus généraliste que le chevreuil et le cerf, et qu'il est donc moins attaché aux zones arborées. Le réalisme des trajectoires simulées serait à améliorer sur les déplacements en ligne droite lorsqu'il n'y a pas d'obstacles. Nous pourrions ajouter des comportements et des évènements d'aléatoires lors du choix de direction de déplacement par l'agent. La définition de l'environnement agent pourrait être complétée par d'autres éléments du paysage favorisant et dirigeant les déplacements comme des structures linéaires de végétation ou des haies. Une amélioration pourrait être de modéliser plus précisément les passages à faune et les corridors sur plusieurs aspects : la configuration du passage à faune et les bas-côtés des infrastructures de transport (routes, voies ferrées) comme des grillages qui dirigent les déplacements des animaux vers le passage.

4.4. Modification de l'importance du rôle de barrière de la nouvelle route pour les simulations de déplacements exploratoires

Nous souhaitons quantifier l'effet de barrière de la nouvelle route à partir de la distribution des localisations simulées de part et d'autre de son tracé. Les simulations dans le cadre des destinations fixées forcent le parcours de l'ensemble du site d'étude et la traversée des obstacles dont la nouvelle route. Pour le scénario 4 (cf. Figure IV.43), nous nous plaçons dans le cas des simulations de déplacements exploratoires et de la construction de la nouvelle route est-ouest. Les déplacements exploratoires pendant une même durée de 24 h permettent de voir si l'agent reste plutôt d'un côté ou de l'autre de la nouvelle route et s'il la traverse. Seul le renard est étudié dans cette partie. 50 points initiaux sont répartis en nombres égaux de part et d'autre

de la route est-ouest construite. Ces points correspondent aux origines des simulations décrites en IV-3.5 et cartographiées en Figure IV.45. Dans un premier temps, l'agent construit 50 trajectoires à partir des 50 origines sur le site d'étude initial puis sur le site modifié par des aménagements. Nous comparons la répartition des localisations simulées de part et d'autre de la nouvelle route dans les différents scénarios. Nous faisons ensuite varier la valeur de la probabilité de traversée de la nouvelle route afin de voir l'effet de l'importance de son rôle d'obstacle sur les simulations.

Les effets de la nouvelle route et des aménagements en faveur de la faune

Nous observons quelles sont les conséquences de la nouvelle route est-ouest sur la répartition des trajectoires simulées. La probabilité de traversée est à présent fixée à 0,1 : l'agent possède une chance sur 10 de traverser la route, soit 10 fois plus que dans les scénarios précédents. La Figure IV.50 montre la différence d'appréhension de l'obstacle que représente la nouvelle route pour une probabilité de 1 % et une probabilité de 10 %. Pour les deux probabilités, les trajectoires sont déviées avant de traverser la voie, mais la trajectoire correspondant à la probabilité de la route à 1 % l'est beaucoup plus. Pour la probabilité de 1 %, les déplacements partent du sud-est et se dirigent vers le nord-ouest. Un parcours est d'abord effectué dans la grande zone arborée. L'agent se dirige ensuite vers les petites zones arborées au nord. La route est dans un premier temps longée, puis après l'emprunt de petites zones arborées, elle est traversée au niveau de ces zones qui sont également proches de bâtiments. La trajectoire est construite de proche en proche en suivant des destinations des thèmes végétation et bâti. Pour la probabilité de 10 %, la trajectoire part du sud-ouest en traversant la zone pavillonnaire. L'agent traverse la route moins de 10 minutes après, puis parcourt une zone arborée au nord de la route. L'agent s'arrête enfin au bout de 24 h.

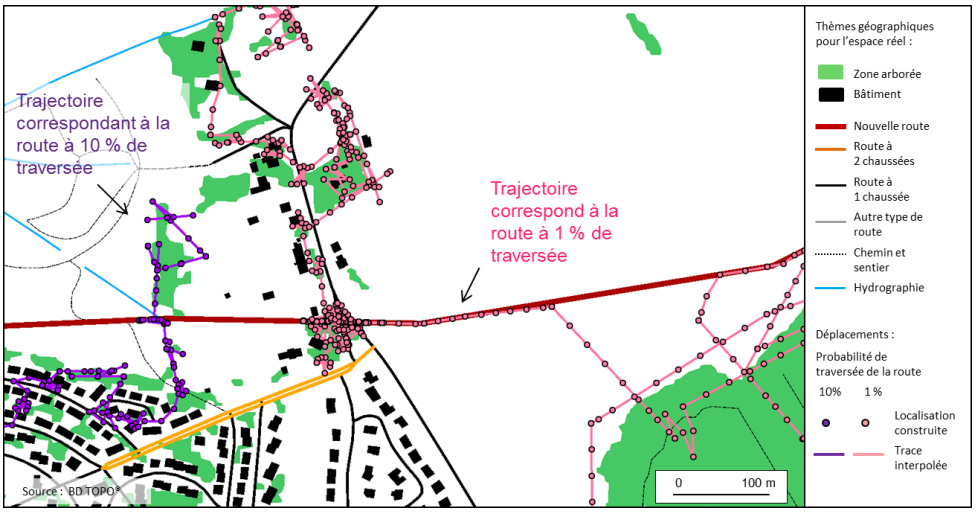


Figure IV.50. Appréhension de la route et sa traversée par un agent, espèce renard. La probabilité de traversée de la route est de 10 % et de 1 % respectivement pour chacune des deux trajectoires.

Dans le cadre des déplacements exploratoires, nous avons diminué la probabilité de traversée jusqu'à 10 %. Nous souhaitons ensuite testé l'effet sur les simulations de la variation de la probabilité entre 0,9 et 0,1 (partie suivante). La probabilité de franchissement de la route de 10 % permet à l'agent un parcours moins contraint du site d'étude qu'avec la probabilité de 1 %. L'effet de barrière est cependant visible et se traduit dans les chemins suivis par l'agent, même s'il n'a pas à atteindre une destination fixée. L'agent traverse la route dans 8 trajectoires sur 50, alors qu'il la traverse dans 17 trajectoires si la route n'a pas un rôle d'obstacle (probabilité de

traversée de 100 % ou sur un site d'étude non modifié). La probabilité de 10 % n'empêche pas totalement les traversées, ce qui est cohérent car des traversées sont réalisées même avec des routes de trafic important (constats des collisions entre animaux et voitures). Nous proposons un indice pour évaluer les conséquences sur les déplacements des trois aménagements. Cet indice calcule le rapport entre le nombre de localisations d'un même côté de la nouvelle route – le côté au sud – et le nombre total de localisations.

$$\text{Indice de répartition des localisations} = \frac{\text{Nombre de localisations au sud de la route}}{\text{Nombre total des localisations}}$$

La valeur de l'indice pour l'espace non modifié est comparée avec celle pour l'espace modifié selon les trois scénarios d'aménagements. Les distances totales sont mesurées afin de comparer l'emprise des déplacements, ici pendant une même durée de 24 h. Le Tableau IV.14 montre les calculs pour les 50 trajectoires lancées une fois à partir des 50 origines de l'agent renard sur le site d'étude initial puis modifié par les différents aménagements.

Tableau IV.14. Les distances totales parcourues et l'indice de répartition des localisations pour les 50 trajectoires construites par l'agent (renard) selon les différents scénarios d'aménagements.

Les scénarios	Distance moyenne parcourue par jour	Indice de répartition des localisations
site d'étude initial	6,9 km	0,42
construction d'une route	6,5 km	0,55
une route et 3 passages à faune	6,5 km	0,50
une route, 3 passages à faune accompagnés d'un corridor écologique	6,8 km	0,41

Sur le site d'étude initial, la répartition des localisations correspond à une valeur d'indice de 0,42. Cela signifie qu'il y a 8 % de localisations en plus du côté nord que du côté sud. Ceci est dû à la configuration des éléments du paysage dans le site initial. Le renard est attiré par les bâtiments de la zone urbaine au nord de la route. Après la construction de la route, l'indice est de 0,55, c'est-à-dire qu'un plus grand nombre de localisations sont situées au sud de la route. Cela signifie que les agents sont freinés dans leur tendance à se diriger vers les destinations au nord de la route. Cette remarque reste valable pour l'aménagement de la route et des 3 passages à faune, avec une répartition similaire des deux côtés de la route (0,50). Les localisations sont donc réparties un peu plus également mais l'obstacle qu'est la route ne semble pas compensé par l'aménagement de passages à faune. Par contre, la valeur de l'indice dans le cas du corridor écologique de 0,41 est équivalente à celle du cas initial, ce qui montre que le corridor compense une partie de l'effet de barrière de la route. Le corridor représente des éléments du paysage d'intérêt pour l'agent qui peut les choisir comme destination et qui peut être amené à essayer de traverser la route pour les atteindre. Concernant les distances moyennes parcourues par jour, leurs valeurs suivent celles des indices sur la répartition. La distance moyenne est égale respectivement à 6,9 km et 6,8 km pour du site d'étude initial et le site avec le corridor écologique. Elle est de 6,5 km après la construction de la route sans autre aménagement ou alors avec uniquement les passages à faune. Nous avons mené un test de Mann-Whitney sur les distances correspondant aux 50 trajectoires obtenues dans les différents scénarios, mais les différences entre les scénarios ne sont pas significatives. Cela peut être dû au fait que les différences de valeur sont relativement faibles. Pour confirmer notre démonstration, il faudrait lancer davantage de simulations qui permettraient de confirmer les valeurs moyennes et l'interprétation à l'aide de la cartographie des trajectoires simulées.

Modification de la probabilité de traversée de la nouvelle route

Nous avons testé l'influence de la valeur de probabilité de traversée de la route sur les déplacements dans le même contexte que la partie précédente mais uniquement pour le cas de la route sans autre aménagement. La Figure IV.51 est un graphique qui montre en abscisse la probabilité de traversée variant de 0,1 (cas présenté dans la partie précédente) à 1 (aucun rôle d'obstacle, équivalent au site d'étude initial) et en ordonnée la valeur de l'indice de répartition des localisations. La valeur de référence de l'indice dans le cas du site d'étude initial est 0,42.

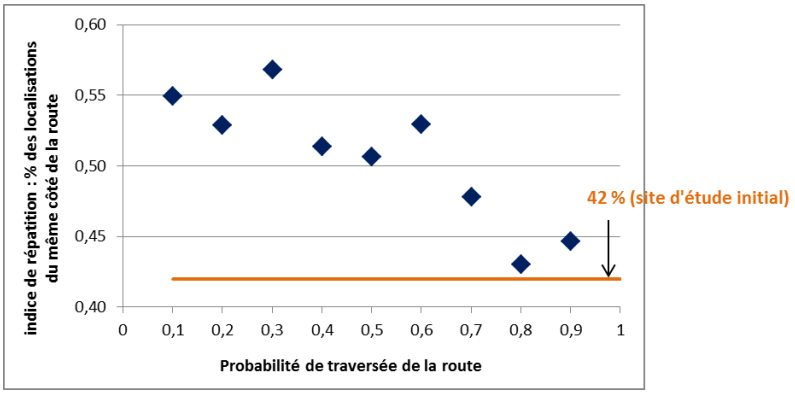


Figure IV.51. Indice de répartition des localisations de part et d'autre de la route en fonction de sa probabilité de traversée, pour le scénario de construction de la route seule. En orange : l'indice de référence dans le cas du site d'étude initial est de 0,42.

Nous constatons que plus la probabilité de traversée est grande, plus les valeurs de l'indice sont proches de celui du site d'étude sans aménagement (42 %), ceci dans le cas de la nouvelle route seule. La valeur des indices a tendance à augmenter lorsque la probabilité de traversée diminue, ce qui signifie que les localisations sont davantage restreintes dans la partie sud du site et que l'effet de barrière augmente. Pour la probabilité de 90 %, l'indice est égal à 0,45, et pour la probabilité de 10 % à 0,55. Le coefficient de corrélation de Pearson est égal à -0,86 avec une significativité élevée inférieure à 1 %.
Nous avons mené le même test de variation de la probabilité de franchissement de la nouvelle route aménagée avec des passages à faune et le corridor écologique. L'indice reste en-dessous de 0,48 lorsqu'il y a un corridor quelle que soit la probabilité de traversée, alors qu'il augmente comme dans le cas de la route seule lorsqu'il n'y a que les passages à faune. Ces résultats tendent à montrer une certaine compensation de l'importance de l'obstacle de la route par la mise en place d'un corridor.

Contrairement aux déplacements à destinations fixées, les déplacements exploratoires sont simulés pendant des durées identiques d'une journée. On observe un effet de barrière de la route construite et une certaine compensation de cet effet par le corridor écologique. Dans le cas des déplacements exploratoires, cet effet est amplifié lorsque la probabilité de traversée diminue.
Le modèle de simulation orienté agent tel que nous l'avons défini permet de visualiser les conséquences d'aménagements sur les déplacements d'animaux. Il permet de modifier l'importance du rôle d'obstacle d'une infrastructure sur les déplacements par les simulations. Ces premiers tests restent limités à des cas d'étude particuliers mais ils nous ont permis d'identifier les points forts et les faiblesses de notre modélisation des déplacements des espèces animales. Il serait nécessaire de mener d'autres tests, notamment sur différents sites d'étude, afin d'enrichir notre modèle.

5) SYNTHÈSE ET DISCUSSION SUR LES RÉSULTATS DE SIMULATION

La simulation de déplacements s'appuie sur la définition d'un modèle réunissant les concepts et décrivant le processus de simulation. La mise en évidence des relations entre paysage et déplacements à partir des analyses des données existantes est conceptualisée dans un modèle. Ces résultats constituent des connaissances intéressantes dans le cadre de la construction de trajectoires théoriques. Elles complètent celles de la littérature. Elles sont ciblées sur les cas d'étude et dans le contexte des données collectées. Dans notre sujet, la conceptualisation concerne les éléments de l'espace géographique caractérisés par rapport aux déplacements. Cette caractérisation est fonction des espèces animales et s'appuie sur des données géographiques existantes. La question posée se rapporte à la détermination d'une modélisation de données adaptée à la représentation des déplacements de la faune dans un espace géographique. La modélisation concerne :

- les données sur les déplacements ;
- les données géographiques ;
- les relations entre les éléments du paysage et les déplacements des animaux.

Nous revenons sur le modèle de données proposé, puis sur les résultats de simulation des déplacements et sur leurs interprétations. Lors de notre collaboration avec les écologues, nous avons eu des remarques sur la détermination de paramètres des agents, puis sur les résultats de simulation, que nous mentionnons au moment approprié.

5.1. Discussion sur le modèle proposé et l'implémentation du modèle orienté agent

5.1.1. Les choix de modélisation

L'espace géographique décrit par des données géographiques peut être lu différemment selon les espèces. Nous avons proposé de caractériser les éléments de l'espace géographique en fonction des espèces et de leurs déplacements. Nous nous sommes concentrée sur les connaissances des déplacements et de l'influence des éléments du paysage. Dans la littérature, le rôle des éléments du paysage peut être explicité selon un vocabulaire différent. Par exemple dans Burel & Baudry (1999), la structure du paysage est une notion parallèle à celle de son type et à celle de son fonctionnement. Les structures en corridor, comme des alignements de végétation ou des réseaux de haies, sont distinctes de leur contenu – essences végétales, taux de fermeture –, et de leur rôle et efficacité : fonction d'habitat ou de couloir de déplacement, possibilité d'un rôle de filtre partiel. Dans Berthoud *et al.* (2004), mentionné en chapitre I, une formalisation des connaissances sur les types d'éléments du paysage est proposée en fonction des groupes d'espèces. Dans le guide du COMOP TVB (2010), les sous-trames constituant la Trame verte et bleue sont définies selon le type de milieu majoritaire. Elles sont également orientées selon leur influence sur les espèces, avec des hypothèses sur leur importance soit comme obstacle soit comme lieu en faveur de la circulation de la faune. Nous avons choisi de distinguer les types d'éléments du paysage, dont les routes, les bâtiments, les zones arborées, des fonctions qu'ils pouvaient représenter : élément favorable aux déplacements, obstacle, élément d'intérêt, élément évité.

Le modèle conceptuel que nous proposons distingue quatre grands groupes de concepts. Deux sont sur la description de l'environnement spatial en fonction des sources de données : les « éléments du paysage » contenant la topographie, l'occupation du sol (données IGN) et une typologie de l'espace (base CORINE Land Cover), et l'« espace fonctionnel » (littérature et

résultats des analyses de données). Les deux autres groupes de concepts concernent les « trajectoires » et les « espèces animales ». Nous avons distingué les éléments du paysage des éléments de l'espace fonctionnel afin de distinguer le type des éléments de leur organisation sur une site d'étude déterminé. Par exemple, un élément comme un cours d'eau peut être isolé dans un milieu forestier ou constituer une composante centrale dans une zone humide. Ce cours d'eau peut avoir un rôle d'obstacle ou être favorable aux déplacements selon les espèces animales. Les trajectoires sont modélisées théoriquement selon le rythme : pause ou déplacement rapide. Les trajectoires observées et celles construites sont définies par deux classes différentes. Elles sont toutefois interpolées à partir de localisations, soit enregistrées soit créées par simulation. Le dernier groupe de classes porte sur le comportement de déplacement des espèces. Le modèle de données permet de représenter les concepts, cependant certaines connaissances peuvent être incomplètes. La description de l'espace par les données géographiques n'est pas exhaustive, par exemple la largeur et la profondeur des cours d'eau (disponibles dans la BD CARTHAGE®, en dehors du RGE®), ou bien les murs et les clôtures pouvant constituer des obstacles. Certains éléments favorables aux déplacements comme des passages souterrains sont absents des bases de données nationales existantes. Concernant le comportement des espèces, les connaissances restent partielles et dépendantes des contextes d'étude. Par exemple, le rayon d'influence des éléments du paysage sur les animaux est difficile à quantifier avec précision car plusieurs facteurs entrent en jeu en plus de celui de la perception individuelle : les effets de masque des éléments du paysage, les conditions météorologiques, la connaissance du territoire dans lequel l'animal se déplace. La distance de perception et d'influence de l'environnement sur les animaux est signifiée comme impossible à quantifier de manière absolue, c'est ce qui ressort de discussions avec les écologues. Nous avons cependant conservé cette notion comme une valeur moyenne et réaliste, sachant qu'elle est modifiable selon les facteurs cités précédemment, car elle nous est utile lors de l'implémentation de notre processus de simulation. Pour ce qui concerne les préférences en termes d'habitat, nous avons fait le choix de nous limiter à des nomenclatures simples (3 classes de peuplements forestiers pour les cervidés, et pour les renards deux classes : zones arborées et bâti). Cet environnement spatial nous permet de tester si notre modèle est valide et d'identifier facilement ses incohérences. Le modèle de données est ensuite implémenté dans un module de simulation représentant une partie des classes du modèle de données.

5.1.2. La définition du modèle de simulation

L'approche agent

Plusieurs stratégies existent pour étudier des dynamiques spatio-temporelles. L'approche par simulation a l'avantage de permettre le test d'hypothèses en créant de nouvelles données. Dans notre étude sur l'influence du paysage sur les déplacements, les hypothèses concernent la définition des contraintes spatiales selon les espèces. Comme énoncé dans l'état de l'art en chapitre I, les modèles de simulation des déplacements d'animaux peuvent exploiter la forme de trajectoires connues, les éléments de l'espace caractérisés selon leur rôle et les préférences spatiales des individus. Les approches peuvent utiliser une modélisation de mouvements browniens, de mouvements de Lévy ou encore de marches aléatoires afin d'identifier les influences sur les choix de déplacement. La modélisation peut également s'inspirer des problèmes de satisfaction de contraintes (CSP pour *Constraint Satisfaction Problem*). Appliquée à la construction de trajectoires, la simulation à partir de CSP formalise les contraintes sur les déplacements et les construit en cherchant à résoudre de manière optimale ces contraintes. La recherche d'une vérification d'un ensemble de contraintes sur un évènement à simuler fait aussi partie de l'approche de simulation par modélisation agent. La simulation par un système multi-

agents (SMA) reprend le principe de satisfaction de contraintes. Ces contraintes peuvent concerner les agents et l'environnement spatial dans lequel évoluent les agents. Nous avons abordé la simulation par une approche orientée agent, les agents étant utilisés pour modéliser les individus et leurs comportements, et l'environnement agent étant constitué des éléments du paysage. Nous avons repris la définition d'un agent donnée par Ferber (1995) par rapport à la définition de notre modèle implémenté. L'aspect important pris en compte dans notre approche est celui de la possibilité de l'agent « d'agir dans un environnement ». Les interactions entre les agents et leur environnement consistent dans le choix de destination et la préférence ou l'évitement de certains éléments lors des déplacements. La perception des agents de leur environnement spatial est bien limitée : seuls les éléments situés dans le rayon de perception sont pris en compte. Une des notions non modélisée et non testée est celle des interactions entre les agents car les trajectoires sont construites pour un agent et celui-ci n'est pas influencé par la trajectoire d'un autre. Notre modélisation ne s'étend pas aux multi-agents mais ceux-ci représentent une perspective pour l'enrichissement du modèle. Les notions de ressources ne sont pas implémentées explicitement. Les ressources des agents sont prises en compte lors de la recherche de destinations intéressantes pour les animaux. Elles peuvent correspondre à des lieux intéressants pour le repos ou des lieux de présence et de consommation de nourriture. Dans notre implémentation, il s'agit par exemple des zones arborées pour les cervidés et aussi des bâtiments (en fait des ressources potentielles à proximité) pour les renards.

L'environnement agent

Quelle que soit la modélisation choisie ou le processus de simulation, la simulation de déplacements s'appuie sur des connaissances existantes obtenues initialement à partir d'observations. Ces observations de cas réels demeurent essentielles d'une part lors de l'étape de définition du modèle et d'autre part lors de l'étape de validation de ce modèle à partir des résultats de simulation. La détermination des paramètres dans le modèle de simulation s'est appuyée sur les connaissances qui sont ressorties des analyses des observations. Dans les travaux précédemment menés, les facteurs d'influence sur les déplacements d'animaux varient selon la problématique et notamment selon le type de déplacement étudié. Dans Jepsen & Topping (2004), les facteurs qui influencent la définition des domaines vitaux par les chevreuils sont identifiés selon leur importance. Ces facteurs concernent les caractéristiques individuelles, la période de l'année, les relations sociales, les types d'occupation du sol. Ils sont pertinents lors de l'étude des déplacements et de l'utilisation de l'espace par les individus au cours d'une année. Bélisle *et al.* (2001) étudient les déplacements de migration des oiseaux s'étendant sur de longues distances. Les paramètres influençant les chemins empruntés entre deux lieux sont le taux de couverture forestière et sa structure. Les distances entre les taches boisées sont intégrées afin de déterminer si elles interviennent dans les succès de retour vers un endroit initial. Comme paramètres, nous avons intégré les distances entre l'agent et les éléments du paysage qui sont des destinations potentielles. Cette distance influence l'agent dans la détermination d'un objectif et dans la direction à suivre. Nous avons également formalisé en paramètres les caractéristiques des éléments. Pour les zones arborées, il s'agit de la superficie, dont les grandes valeurs sont considérées comme plus intéressantes pour les animaux. La configuration des éléments du paysage pouvant constituer des obstacles ou favoriser les déplacements est intégrée dans les choix de destination par leur présence entre l'agent et les destinations potentielles. Elle influence les agents dans leurs choix de direction. Les obstacles font dévier la trajectoire des agents lorsqu'ils se déplacent vers la destination sélectionnée. La modélisation des éléments du paysage selon les quatre rôles principaux que nous avons arrêtés est importante. Nous avons associé un ou plusieurs rôles à chaque thème géographique. Aucun élément dans les données n'est neutre, c'est-à-dire pouvant être parcouru ou traversé sans

conséquence, sauf ceux qui n'étaient pas renseignés dans la BD TOPO® (par exemple les zones blanches pouvant correspondre à des cultures, des prairies, des sols nus, des pelouses naturelles). Dans la réalité, la neutralité de certains éléments du paysage peut être discutée. Nous ne prenons en compte que ceux qui sont susceptibles d'agir sur les déplacements. L'attribution des rôles aux éléments est fonction de l'espèce. Les trois espèces étudiées, renard, chevreuil et cerf, sont relativement proches. Ce sont des mammifères de taille moyenne à grande qui se déplacent selon des vitesses similaires mais qui diffèrent quant à leur capacité d'adaptation, le renard étant plus généraliste que les cervidés. Le rôle des éléments du paysage est modulé selon leur importance. C'est notamment le cas pour les éléments qui font obstacle, dont l'intensité de l'effet de barrière est fonction de la taille des espèces et de leur mode de déplacement. Nous avons considéré les éléments obstacles et ceux favorables aux déplacements comme des entités séparées. Nous aurions pu les modéliser par des graphes de connectivité du paysage ou de barrières comme dans Foltête *et al.* (2012) et Scolozzi & Geneletti (2009). En plus des infrastructures de transport – routes et voies ferrées –, les éléments qui font obstacle considérés dans l'environnement spatial agent, sont l'hydrographie et les bâtiments. Le bâti est un thème particulier car les bâtiments ne peuvent être traversés et constituent un obstacle physique hermétique. Nous les avons associés de plus à des destinations potentielles pour les renards car ces derniers peuvent être attirés par les jardins ou par des ressources laissées par les hommes. Comme les autres éléments du paysage, la densité du bâti dépend du site d'étude et des milieux présents. La superposition des effets de barrière des éléments dans des zones densément aménagées avec beaucoup de routes et de bâtiments, peut représenter des problèmes dans leur prise en compte lors de la simulation. Il peut alors être intéressant de fusionner les informations et de les prendre en compte de manière agrégée afin d'alléger le calcul des itinéraires. La prise en compte d'éléments non présents dans les bases de données est intéressante car nous avions pour objectif d'identifier si des enrichissements dans la description du territoire seraient pertinents dans l'étude de la faune et des effets de modifications du paysage. Les grillages représentent par exemple des obstacles pouvant être difficiles à franchir selon les espèces. Ils sont considérés dans l'aménagement du réseau routier et sont cartographiés afin d'identifier les zones fragmentées et les endroits où il est pertinent de placer des constructions en faveur de la circulation de la faune (Sétra, 2000). C'est d'ailleurs un moyen de gestion de la faune sauvage en limitant leur passage dans des lieux sensibles à leur exploitation (cultures, parcelles forestières en régénération) ou dans des lieux dangereux (routes, voies ferrées). Nous avons numérisé sur le site d'un renard à Nancy des grillages et des clôtures, d'après des observations de terrain et des sources photographiques. Ce site est en milieu urbain, et il est déjà densément occupé et donc déjà très contraint, ce qui peut diminuer l'influence de ces nouveaux éléments de barrière par rapport aux autres éléments freinant les déplacements (routes, bâti). Nos essais ont montré que certaines morphologies d'habitat étaient concernées par ces barrières, ce qui ouvre des perspectives pour améliorer la simulation de leur effet d'obstacle.

Les algorithmes de construction de trajectoires

Le modèle établissant les comportements des agents et leur environnement comprend les algorithmes de déplacements. Nous avons d'abord testé une fonction d'intérêt au déplacement s'inspirant des moindres coûts (La Morgia *et al.*, 2011). Dans ce cas, les trajectoires simulées étaient en partie décevantes du fait de la superposition de la trajectoire simulée avec certains éléments du paysage comme les bâtiments. L'avantage de cette fonction est néanmoins de prendre en compte par un indice synthétique les éléments favorables et défavorables au déplacement dans les choix de direction. Une amélioration de notre algorithme d'intérêt au déplacement pourrait consister à réduire la valeur des angles de direction considérés par l'agent

(lors de nos tests égaux à 36°). Nous avons finalement utilisé un algorithme par projetés de rayon afin de construire la trajectoire qui contourne les obstacles point par point, mais qui ne prend pas en compte explicitement les éléments d'intérêt dans la construction des trajectoires (juste dans le choix de destination), dernier point qui pourrait représenter une perspective d'amélioration. Les stratégies de construction de trajectoires peuvent s'inspirer de l'algorithme du plus court chemin de Dijkstra, ou encore de celui de A* (Kallman, 2005). Ces algorithmes s'appuient sur des graphes et demandent une modélisation supplémentaire des données. Les simulations utilisant les vols de Lévy ou les mouvements browniens s'appuient sur des distributions de fréquences des distances et des angles de direction. Nous avions testé cette approche en intégrant des probabilités de distances entre les points et de changements de direction. Cependant, les données disponibles sur les déplacements sont restreintes et les possibilités de comparaison également. Cela constitue cependant une piste afin de tester des hypothèses sur le rôle des éléments du paysage sur les trajectoires des animaux. Les distributions des angles et des distances entre chaque pas de temps sont par exemple exploitées dans les travaux de Fortin *et al.* (2005) sur les interactions entre les wapitis et les loups, et dans ceux de Coulon *et al.* (2008) sur les chevreuils dans le but d'identifier l'influence du paysage sur leurs déplacements. Le nombre d'individus suivis, par exemple dans Fortin (2005), est de 11 wapitis et le nombre de segments homogènes par individus est de plus de 150, nombre supérieur à nos cas d'étude sauf pour les chevreuils suivis en Haute-Garonne.

5.1.3. Implémentation du modèle de simulation

Nous avions dans un premier temps développé un prototype dans le logiciel Cormas (non présenté dans ce mémoire). Cette plateforme dédiée aux systèmes multi-agents est adaptée à l'étude des écosystèmes, à leur fonctionnement, et à leurs interactions et gestion avec et par les hommes (Becu, 2006). Nous avons repris notre stratégie générique de construction de trajectoires : les agents cherchent leur destination et se déplacent jusqu'à la destination. Les agents modifient la destination si celle-ci n'est pas atteinte au bout d'une certaine durée. L'environnement est défini par automate cellulaire, c'est-à-dire qu'il est découpé en cellules ici de forme carrée et de taille égale. Chaque cellule correspond à une occupation du sol unique : végétation, bâti, chemin et route distinguée entre grande et moyenne importance. La modélisation de l'espace fonctionnel parcouru par les agents et un exemple de simulation sont montrés en Figure IV.52.

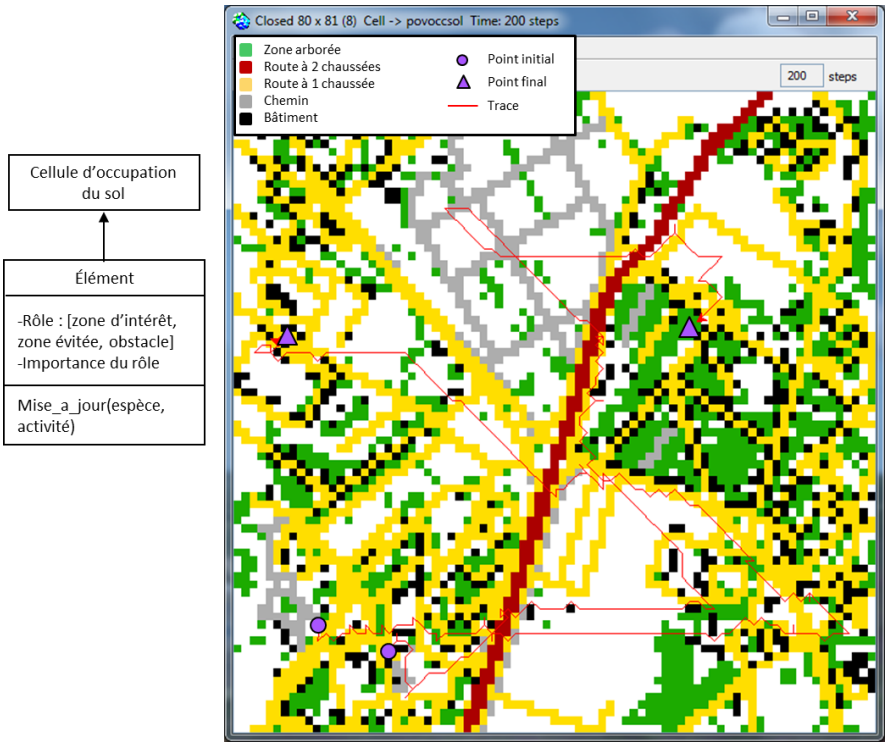


Figure IV.52. L'espace modélisé et la visualisation de deux trajectoires simulées pour le renard pendant 3 heures dans le logiciel Cormas. Un pixel représente sur 25 m sur 25 m.

Les simulations de la Figure IV.52 se rapportent à deux agents de l'espèce renard débutant à deux points initiaux différents. Les trajectoires sont construites pour une durée de 3 heures en prenant en compte l'occupation du sol. Aucune destination à atteindre n'est fixée préalablement ; les déplacements sont de type exploratoire. Les éléments d'intérêt constituant des destinations potentielles sont la végétation lorsque l'activité est le repos, et la végétation et les bâtiments lorsque l'activité est la recherche de ressources. Les routes de grande importante (à deux chaussées) sont associées à une probabilité de traversée de 0,2, les routes de moyenne importance (à une chaussée) de 0,5. Les chemins ne constituent pas des obstacles. Les bâtiments ne sont pas traversables. Dans l'illustration, les déplacements sont déviés par les routes et les agents longent les voies notamment celles avec une faible probabilité de traversée. Les espaces non renseignés, en blanc, sont traversés sans comportement particulier. Les déplacements s'y effectuent en ligne droite. Les zones les plus densément occupées par les bâtiments et les routes, sont associées à des déplacements plus sinueux. L'environnement spatial ainsi défini simplifie néanmoins les informations initiales et les géométries des éléments du paysage sont moins précises que dans la modélisation en vecteur des données géographiques.

Afin de conserver la précision des données initiales et de contrôler les interactions entre les agents et leur environnement, nous avons développé notre modèle de simulation complet dans GeOxygene. Cela nous permet d'utiliser des méthodes existantes d'analyses spatiales et de développer des comportements adaptés entre les agents animaux et les données de description de l'espace. Nous avons défini deux stratégies principales pour les algorithmes de construction de trajectoires en lien avec l'échelle spatiale considérée : une fonction de coût (représentant l'intérêt) au déplacement et une fonction par projetés de rayon. La fonction d'intérêt détermine une direction privilégiée, en considérant les données géographiques de manière agrégée dans une certaine partie de l'espace autour de l'agent. L'appréhension des obstacles est globale et leur géométrie n'est pas prise en compte. La superposition des bâtiments avec la trajectoire

simulée est alors possible, et certaines portions de trajectoires construites ne sont pas cohérentes si l'on revient aux données géographiques initiales comme illustrée en Figure IV.53.

Figure IV.53. Les points de la trajectoire d'un renard sont construits à partir de la fonction de coût, avec des intervalles de temps de 2 min et une vitesse moyenne de 2,2 km. Le point initial est situé en haut et la destination est hors cadre en bas à droite. Cinq directions sont prédéfinies à partir d'arcs du cercle de 36° centrés autour de la direction de la destination correspondant à une zone arborée. Le coût au déplacement est calculé en fonction de la direction de la destination et de l'occupation du sol dans les arcs de cercle. La direction correspondant au plus faible coût et au plus grand intérêt est conservée. Certains bâtiments peuvent ainsi être traversés par la trace interpolée sans contournement marqué.

La méthode par fonction de coût reste intéressante pour évaluer des chemins sur de grandes distances, par exemple lors de déplacements de migration de plusieurs dizaines de kilomètres. Elle a alors tendance à détourner les trajectoires des zones urbanisées comportant trop d'obstacles et à privilégier les zones avec un couvert arboré. Dans ce cas, la modélisation du bâti par le diagramme de Voronoï, peut représenter une option judicieuse. Ce diagramme permet de visualiser la densité des bâtiments et de la prendre en compte dans leur contournement ou leur parcours par les agents. Il permet également d'aider à la caractérisation des types de bâti en milieu périurbain. Une autre perspective mentionnée plus haut, consisterait à améliorer la résolution spatiale des arcs de cercle afin de décrire plus finement l'hétérogénéité du paysage.
Nous avons privilégié une approche à grande échelle, par projetés de rayon afin de définir de manière plus précise la trajectoire en fonction de la présence d'obstacles. Cependant des problèmes de cohérence et de réalisme des déplacements se posent. Les éléments du paysage sont perçus à l'intérieur du rayon de perception des agents mais leur géométrie est appréhendée lors de la construction de la trajectoire point par point. Cette méthode présente l'inconvénient de ne pas prendre en considération les éléments du paysage constituant un élément d'intérêt au cours de la construction de la trajectoire. Il peut aussi arriver que les agents se retrouvent bloqués par des bâtiments aux formes trop complexes. Nous avons pallié ce problème en utilisant les enveloppes convexes de chaque bâtiment, ce qui a pour effet de lisser les contours et d'éviter les situations de blocage (voir Figure IV.54). La prise en compte à grande échelle des données géographiques permet d'estimer des lieux de passage via les trajectoires créées. Les lieux de passage correspondent dans notre implémentation à des destinations temporaires entre la localisation initiale d'un agent et un élément d'intérêt à atteindre.

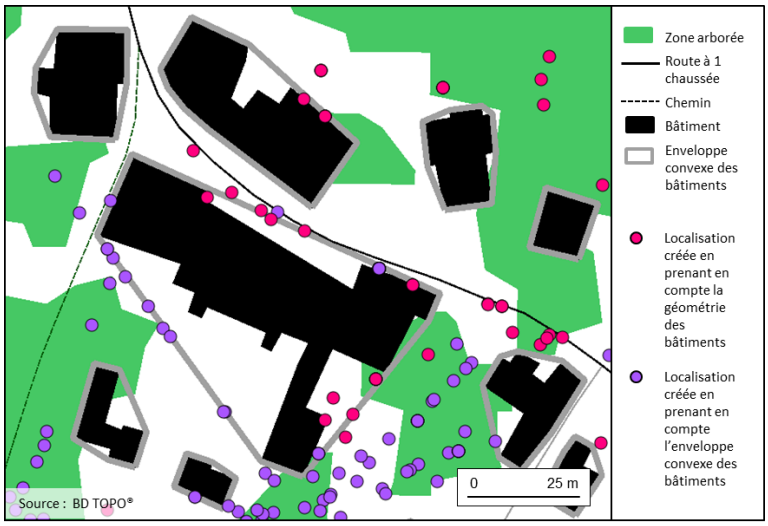


Figure IV.54. Prise en compte de la géométrie des bâtiments ou de leur enveloppe convexe : deux extraits de trajectoires. Les enveloppes convexes permettent aux agents de ne pas se retrouver bloquer dans des coins de bâtiments avec des formes complexes. Ici le grand bâtiment central est contourné de loin avec l'enveloppe convexe, et l'agent s'en rapproche sans être bloqué par une prise en compte de la géométrie initiale.

Des simulations de trajectoires ont été lancées avec différents paramétrages afin d'évaluer la justesse des comportements implémentés. La validation du modèle passe par des tests sur la variation de la valeur d'un paramètre, comme par exemple le rayon de perception de l'agent. Elle repose ensuite sur la comparaison entre les déplacements observés et les déplacements simulés. Les trajectoires interpolées à partir des localisations GPS sont exploitées afin d'estimer la cohérence des trajectoires simulées. Pour comparer les résultats des différents paramétrages entre eux et les résultats avec les observations, nous comparons la forme des trajectoires, par exemple par la distance totale parcourue comme dans Coulon *et al.* (2010). Nous calculons aussi des relations spatiales entre les trajectoires interpolées ou simulées et les données géographiques : distance aux différents thèmes, caractéristiques de l'espace fréquenté et des zones qui sont intensément parcourues. Dans la littérature, les comparaisons avec les observations peuvent concerner les distributions de distances et d'angles relatifs (Mechoud *et al.*, 2000 ; Hooten *et al.*, 2010). Nous avons considéré la distribution des vitesses et non des distances afin de remédier à la variation des intervalles de temps entre les enregistrements GPS. En plus, les distributions des angles entre les localisations enregistrées et simulées sont comparées lorsqu'elles ne sont pas exploitées directement en entrée de la simulation (nous avions juste effectué un test peu concluant avec les angles relatifs observés en entrée de la simulation). Un des problèmes reste la faible quantité de données d'observation. Si le nombre de traces enregistrées est important, il serait possible d'en utiliser une partie pour construire le modèle et le restant pour le valider. Dans le cas des renards en milieu périurbain autour de Nancy, une trace pendant 24 h est disponible pour trois individus sur quatre et le quatrième individu est suivi pendant 12 h. Pour les données sur les cervidés dans les Vosges, les traces quotidiennes par individu sont entre 3 et 6, ce qui laisse des possibilités de comparaison entre les journées de suivi. L'échantillon de données sur les chevreuils à Aurignac comprend 70 individus suivis pendant une ou deux années. Il représente une source d'enrichissement du modèle indéniable, que ce soit par le nombre de localisations disponibles que pour le milieu agricole et boisé différent du milieu forestier des Vosges. Pour les sites d'étude utilisés lors des simulations, il nous a semblé cependant judicieux de comparer des trajectoires observées et simulées à partir d'un même point initial et pendant une même durée. Cela permet de comparer les chemins empruntés et l'intensité de la fréquentation de l'espace. Nous avons adopté une approche d'analyse des relations entre trajectoires et thèmes géographiques, en parallèle d'une

approche s'appuyant sur l'interpolation des localisations. Ceci permet de caractériser et de comparer visuellement les lieux fréquentés. Nous avons également demandé aux écologues de regarder les trajectoires afin d'avoir un avis sur la cohérence des résultats de simulation, en dehors des comparaisons quantitatives.

5.2. Retours sur les simulations de déplacements et de modifications de l'espace

L'objectif était de proposer une approche d'évaluation des effets de modifications du paysage sur les déplacements, ce que nous abordons par les résultats de simulation de trajectoires. Nous nous sommes concentrée en particulier sur deux sites d'étude, correspondant à ceux des observations et ayant fait l'objet d'analyses présentées dans le chapitre III. Le premier site d'étude est en milieu forestier avec un relief vallonné. Nous avons effectué des analyses dans ce milieu uniquement sur les cervidés. Le second site d'étude concerne une agglomération urbaine et nous permet de tester les lieux de déplacements des renards. Nous avons utilisé une partie moins urbanisée de ce dernier site pour lancer de manière cohérente et comparative des déplacements simulés des trois espèces étudiées et pour tester les effets des modifications du paysage. Les chevreuils et les cerfs vivent en effet a priori davantage dans des zones boisées entourées de champs, alors que les renards peuvent avoir des habitats plus variés qui incluent des zones urbanisées. Nous avons modifié le site d'étude en créant numériquement des modifications de l'espace – route – et des aménagements en faveur de la faune – passage à faune, corridor écologique.
Les simulations de déplacements que nous avons lancées sont au nombre de 5 000 trajectoires, correspondant à environ 17 millions de localisations créées, en comptant les tests sur le paramétrage et les lancements de simulation pour les différents scénarios d'aménagements. Le nombre de localisations enregistrées contenues dans l'ensemble de nos cas d'étude est de 650 000. En excluant le cas des chevreuils à Aurignac peu pris en compte dans le chapitre IV, ce nombre est de 8 000, ce qui est relativement peu dans l'absolu mais qui, en complément de la littérature, nous apporte une connaissance directe de déplacements d'animaux.

5.2.1. La simulation des trajectoires

Concernant le cas d'étude sur les cervidés dans les Vosges et pour les déplacements de types exploratoires, les chemins sont dirigés en fonction des peuplements forestiers principaux. Nous avons utilisé les essences cartographiées dans la BD TOPO®, réparties en trois classes sur le site : les feuillus, les conifères et les peuplements mixtes. Ces trois classes peuvent être considérées comme peu détaillées, d'autant plus pour les chevreuils qui se déplacent sur de plus petits espaces et qui sont a priori plus sélectifs dans leur ressources et donc dans leurs destinations temporaires que les cerfs. Nous avons traduit les préférences spatiales des chevreuils pour les feuillus et les mixtes par un coefficient d'intérêt élevé pour choisir comme destination ces peuplements alors que les cerfs ont des coefficients d'intérêt davantage égaux entre feuillus, mixtes et conifères. Cette différence dans le comportement est atténuée par le fait qu'il y a peu de classes de peuplement dans la base de données choisie. Nous avons mené en parallèle de la mise en place du modèle de simulation, des analyses spatiales et statistiques sur la fréquentation par les cervidés à partir de la nomenclature plus précise des peuplements forestiers issue de la base Carte Forestière. Les résultats de ces analyses nous ont permis de mieux hiérarchiser les préférences notamment en fonction du type de déplacement. Nous pourrions non seulement intégrer au modèle des préférences spatiales d'exploitation en fonction des peuplements forestiers plus précisément décrits, mais également en fonction de

zones d'intérêt locales pour des déplacements rapides pouvant se situer le long d'une trajectoire. Ceci offre une perspective d'amélioration de la considération des préférences spatiales notamment sur les sites où les données sur les peuplements forestiers sont disponibles. La prise en compte du relief dans les simulations concerne les pentes, la sélection d'altitudes privilégiées étant plutôt liée à celle d'un type d'habitat pour le choix d'un domaine vital. La considération des pentes peut être améliorée par une définition plus précise du seuil maximal de pente entre deux localisations créées. Ce seuil permet en effet de limiter le parcours de zones trop pentues mais peut manquer de précision. Il ajoute une part d'aléatoire en ne distinguant pas les chemins en-dessous de ce seuil et en ne sélectionnant pas le chemin avec une pente optimale. Si l'on revient à l'ensemble des trajectoires simulées, les pentes parcourues par les agents sont réparties dans des pentes plus élevées que dans la réalité, ce qui signifie que le modèle sous-évalue l'influence des pentes dans les comportements de déplacement. Le parcours des pentes dépend également du type de mobilité des cervidés, ce qui pourrait être précisé dans le modèle, par exemple pour les chevreuils : une faible mobilité sur les petites pentes et des déplacements rapides sur des pentes fortes.

Les écologues nous ont suggéré de bien prendre en compte les éléments de l'espace qui correspondent à des lieux d'intérêt pour les ressources ou pour le repos, comme des peuplements forestiers particuliers. Les chemins pour atteindre ces lieux d'intérêt et pour les parcourir seraient alors influencés par la pente. Une autre remarque est que les trajectoires simulées des deux espèces de cervidés correspondent à de plus grandes distances que dans la réalité et s'effectuent sur de grandes espaces. Cela signifie que les déplacements sont surestimés par le modèle et que les rythmes implémentés prévoient trop peu de phases de repos et de pauses pour la consommation des ressources alimentaires. Nous prenons en compte une vitesse moyenne de déplacement et nous traduisons l'alternance entre les phases de repos et les phases de recherche et consommation de ressources par une différence dans la sélection des destinations. Cela ne suffit pas pour reproduire les ruptures de rythmes. Les distances excessives signifient également que les destinations temporaires sont plus éloignées les unes des autres dans l'environnement agent que dans l'environnement réel. Ceci coïncide avec la précision de la description en essences forestières qui est inférieure à la précision avec laquelle la sélection des essences est réalisée par les chevreuils.

Pour le second site d'étude à Nancy, les tests réalisés sur les renards montre aussi des différences entre observations et simulations concernant les relations entre les trajectoires interpolées et les éléments du paysage. À partir d'un même point initial et sans destination fixée, le nombre d'intersections avec des routes est plus grand dans les simulations que dans les observations, mais le nombre de routes concernées est plus petit. Le modèle tel qu'il est implémenté a plutôt tendance à limiter la proximité des routes mais à augmenter les traversées. L'approche des routes s'effectue en les longeant si elles ne sont pas traversées immédiatement, ce qui peut augmenter le nombre de destinations choisies à proximité des routes ainsi que le nombre des traversées. Les déplacements sont testés pendant 24 h. Si l'on ramène les résultats à 12 h, la différence entre observations et simulations est moindre si l'on choisit la période nocturne au cours de laquelle les renards parcourent des distances plus importantes et s'éloignent de leurs emplacements diurnes. Cela signifie que les rythmes implémentés pour les renards sont trop soutenus par rapport à la réalité et pas assez différenciés entre les périodes diurnes et nocturnes. L'alternance entre phases de repos pendant lesquelles les individus bougent peu et phases d'activités, pourrait être plus marquée par exemple en définissant des vitesses différentes.

5.2.2. Évaluation des effets d'aménagements

Nous avons simulé la construction de plusieurs modifications de l'espace sur un site commun et visualisé les effets sur les déplacements simulés des trois espèces animales considérées. Nous avons comparé les chemins empruntés avant et après les modifications de l'espace. Dans un premier temps, les simulations ont été lancées dans un espace non modifié à partir de plusieurs points initiaux et vers des destinations fixées, c'est-à-dire à partir d'une matrice origine-destination. Les déplacements dirigés ont tendance à uniformiser les chemins empruntés pour un même agent par rapport aux déplacements non dirigés qui peuvent être orientés dans des directions diverses. Les agents sont en quelque sorte poussés à parcourir des zones qu'ils n'auraient pas empruntées lors de déplacements exploratoires. Cela amène quelques incohérences sur les comportements des espèces. Pour les cervidés notamment, la proximité au centre-ville de la commune dans les déplacements simulés est peu probable. De plus, sur le site d'étude choisi, la description précise des essences forestières n'était pas encore disponible dans les bases de données. Une tâche complémentaire serait de les préciser par photo-interprétation et par un travail de terrain car les cervidés ont un comportement motivé entre autres par la sélection des essences intéressantes. Pour les renards, la fréquentation des zones urbanisées est constatée, due à la densité de bâtiments et à la présence de nombreuses petites zones arborées. La fréquentation des bois est par contre sous-estimée par rapport aux observations.
Dans l'étude des conséquences des modifications du paysage, nous avons pu tester les effets de la construction d'une route sur les déplacements des renards et des cervidés. La répartition des trajectoires simulées montre un effet de barrière qui limite la fréquentation de certains lieux d'intérêt. Les tests ont ensuite porté sur l'aménagement de cette même route et de trois passages à faune, ce qui représente un passage à faune tous les 2 km en moyenne. Les effets de ces passages ne sont pas significatifs par rapport à la construction de la seule route. Cela peut venir de leur modélisation simplifiée par une coupure dans la voie et une unique zone arborée. L'aménagement de corridors écologiques en pas japonais répartis sur le site d'étude et menant aux passages à faune a pour conséquence de limiter l'effet de barrière de la route. Les agents empruntent en fait les zones arborées modélisant les corridors. Cela peut les amener jusqu'aux passages qui les font traverser sans rencontrer l'obstacle de la voie. Ces résultats sont confirmés par l'étude des déplacements exploratoires simulés (sans destinations fixées) : le corridor semble compenser l'obstacle de la route. Les conclusions tirées des simulations ne sont cependant pas significatives statistiquement et il serait nécessaire de lancer un plus grand nombre de simulations pour chaque scénario d'aménagement. Ces conclusions sont par ailleurs attachées à ce cas d'étude et à ce site, et restent à valider à partir d'autres cas. Dans l'approche par fonction de coût au déplacement de Guinard & Ferreira (2008), les passages à faune ont des effets compensatoires clairs pour relier deux points de part et d'autre d'une route. Cet effet n'est pas observé dans notre test car notre modèle agent construit des trajectoires de proche en proche. Si l'agent n'est pas amené à proximité des passages à faune alors ceux-ci ne sont pas empruntés. Dans notre objectif de déduire les lieux de déplacements, nous avons pu évaluer que l'ajout de corridors à des passages semble une option intéressante pour pallier la fragmentation de l'espace par de grandes infrastructures de transport linéaires.

5.2.3 Utilisation des données géographiques pour la simulation

D'un point de vue des données géographiques, nous avons défini un environnement agent à l'aide des informations contenues dans la BD TOPO® sur lesquelles nous revenons à présent. En parallèle de la simplification des comportements des animaux dans notre modèle, il nous apparaît que certaines données géographiques sont d'une précision spatiale trop petite pour la

simulation notamment d'un point de vue de leur nomenclature. Une cartographie des essences forestières séparées serait utile pour identifier la sélection précise par les cervidés. Cette cartographie serait par contre très coûteuse et peut être effectuée que sur des sites particuliers et non à l'échelle nationale. La cartographie des essences principales dans la base Carte Forestière concerne principalement le couvert arboré, ce qui exclut les autres couvertures végétales.

Les occupations du sol en dehors des zones arborées ou des zones urbaines sont d'autres natures que celles saisies dans la BD TOPO®. Les espaces non renseignés représentent dans notre environnement agent des espaces « vides ». Les informations sur les cultures et sur les prairies sont intéressantes en zone agricole car elles sont parcourues et exploitées par les espèces animales. Dans nos cas d'étude, ces informations sont pertinentes en dehors des zones urbaines : pour les renards en dehors des centres-villes denses, et pour les chevreuils et les cerfs vivant surtout en milieu boisé mais s'aventurant dans les cultures et les prairies en lisière.

La description de l'hydrographie est intégrée dans l'environnement agent, même si l'influence est limitée à celle de barrière aux déplacements et que les analyses de données n'ont pas montré d'influence directe sur les animaux. L'intégration des informations de la BD CARTHAGE® pourrait apporter des améliorations, notamment dans la précision du rôle d'obstacle et aussi d'attraction pour certaines espèces animales.

La couverture des routes et des chemins ainsi que des voies ferrées est quasi exhaustive d'un point de vue des tracés sur le territoire national. Les attributs sur leur nature et l'importance des routes donnent des indications sur leur largeur et sur leur trafic, deux facteurs qui sont liés à l'intensité de leur effet de barrière. Notre implémentation considère les routes comme des barrières et celles-ci sont associées à une probabilité de traversée. Cela entraîne des déplacements à proximité des voies lorsque la traversée n'est pas réalisée immédiatement et que l'agent longe la route en attendant de la traverser soit par un passage favorable soit par audace. Cela peut donc représenter une attraction des agents autour des routes même si celles-ci ne sont ni des lieux favorables aux déplacements ni des destinations. Cependant, les routes pourraient aussi être associées à des zones de déplacements privilégiées. Ce dernier rôle dépend du type de route et du voisinage de la route. Par exemple dans le site d'étude des Vosges, le milieu est forestier et vallonné et les voies d'accès ont une circulation réglementée induisant peu de dérangements pour les cervidés. Les routes passent par des endroits plats, et elles représentent des zones dégagées avec des espèces végétales différentes de celles constituant le cœur de la forêt. Dans ce cas, les routes peuvent donc être explicitées comme des éléments favorables au déplacement. L'enrichissement du paramétrage des rôles des éléments du paysage représente une perspective.

La saisie du bâti dans la BD TOPO® est au moins de 95 % d'exhaustivité, ce qui en couvre une grande partie. La prise en compte des formes complexes des bâtiments peut ne pas être pertinente dans l'intégration des obstacles dans l'environnement agent. Leur présence et leur densité sur une zone concorde par contre bien avec l'effet soit d'éloignement soit d'attraction que les zones bâties ont sur les animaux. Le bâti intéressant pour le renard peut être associé à la proximité de jardins, d'espaces verts, ou de grandes surfaces. Il peut être caractérisé selon les zones pavillonnaires avec de petites parcelles, beaucoup de barrières et une fréquentation humaines importantes. Il peut aussi l'être selon des zones commerciales ou industrielles correspondant à de plus grands espaces moins densément occupés par l'homme.

RÉSUMÉ DU MODÈLE DE SIMULATION

Nous sommes partie de connaissances sur les déplacements de la faune que nous avons formalisées et organisées dans un modèle de données. Ces connaissances sont issues de la littérature et sont également constituées d'hypothèses et de résultats d'analyses de données entre localisations et éléments du paysage. Nous nous appuyons sur la conceptualisation orientée agent afin de lancer des simulations de trajectoires. Les résultats de simulation de trajectoires sont analysés en exploitant une caractérisation des données géographiques par le rôle des éléments du paysage sur les comportements de déplacement des espèces animales. La validation du modèle et les propositions d'améliorations se sont appuyées sur la comparaison entre observations et simulations. Les scénarios d'aménagements concernent la construction d'une route associée ou non à des passages à faune, et éventuellement à des corridors écologiques. La synthèse des résultats des tests de simulation est présentée en Tableau IV.15.

Tableau IV.15. La synthèse des tests de simulation de déplacements d'animaux et de modifications de l'espace.

Caractérisation du site	**Description des tests**		**Améliorations possibles**
	Déplacement par espèce	Effet des modifications de l'espace	
Forêt vallonnée	Les déplacements des chevreuils et des cerfs sont surestimés par rapport à ceux observés. Le parcours des zones forestières selon les peuplements principaux est assez respecté. Les pentes parcourues sont surestimées.		La prise en compte des éléments de l'espace pourrait être ajustée : les peuplements forestiers et les pentes. Les rythmes d'activités sont également à revoir, notamment en prenant en compte une description plus précise de l'espace.
Zone périurbaine	Les trajectoires simulées des renards sont proches de celles observées, concernant les relations aux éléments du paysage. Les surfaces parcourues correspondent également aux observations.	Un enrichissement de la description de l'espace a été testé : des éléments de barrières comme des clôtures ou des murs ont été numérisés. Les déplacements sont peu modifiés et ne ressemblent a priori pas beaucoup plus à ceux observés.	La prise en compte des rythmes d'activités est à améliorer entre phases de repos et phases de recherche de ressources, notamment pour les déplacements quotidiens en considérant la période diurne et la période nocturne. Une numérisation des éléments de barrières plus exhaustive serait à tester, ainsi qu'une description plus fine des types de bâti.
Transition entre commune, bois et prairies	Sur un même site, les simulations des déplacements des trois espèces -renard, chevreuil, cerf- correspondent à des comportements distincts. Les éléments d'intérêt différents entre le renard (végétation, bâti) et les cervidés (végétation) influencent la répartition des localisations. Le chevreuil se déplace sur des espaces plus restreints que le cerf.	Trois aménagements sont testés pour les renards : (1) une route, (2) une route et des passages à faune, et (3) une route avec des passages à faune accompagnés de corridors écologiques. Les scénarios (1) et (2) ont un effet de barrière marqué. Le scénario (3) semble compenser le frein que représente la route dans les déplacements.	Un autre site d'étude correspondant à un milieu différent serait à tester afin d'observer les diversités de comportement entre espèces animales. D'autres aménagements pourraient être évalués, en faisant varier : la densité des passages à faune et leur forme, la configuration des corridors écologiques (comparaison entre pas japonais et corridor continu).

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Notre thèse concerne la problématique de la compréhension de l'influence de l'espace sur les déplacements d'animaux et la contribution des données géographiques à cette compréhension. Nos hypothèses de départ portent sur le fait que certains éléments du paysage favorisent ou freinent les déplacements et que les données géographiques permettent de mieux expliquer certains choix de parcours. Nous effectuons un résumé des résultats obtenus au cours de la mise en œuvre décrite dans le chapitre III pour les analyses de données et dans le chapitre IV pour la modélisation et la simulation. Nous réalisons une présentation synthétique de l'ensemble des résultats, tout en identifiant les apports du travail vis-à-vis de la littérature (partie 1). Nous déterminons ensuite les perspectives de la thèse (partie 2). Ces perspectives concernent d'abord les développements effectués dont certains aspects peuvent être améliorés et enrichis. Ensuite, les perspectives portent sur les applications possibles de notre approche, principalement sur la prise en compte des déplacements de la faune en aménagement du territoire.

1) SYNTHÈSE DES RÉSULTATS ET CONCLUSIONS

Les résultats attendus de la thèse s'inscrivent dans les deux grandes parties de l'approche : des résultats d'analyses de données et des résultats de simulation de déplacements en fonction des éléments du paysage. Ces résultats correspondent à nos objectifs de départ définis dans le chapitre I-3. Nous les énonçons en différents thèmes : aspects méthodologiques, résultats d'analyse de données, modélisation et simulation, développement informatique. Nous tentons de mettre en avant pour chacun de ces points, les réalisations qui nous ont semblées marquantes par rapport aux objectifs initiaux et aux travaux existants.

1.1. L'intérêt de l'approche globale

Les attentes de l'approche globale concernent plusieurs points : la définition des méthodes permettant de caractériser l'influence du paysage sur les déplacements ainsi que les méthodes pour tester les conséquences d'aménagements sur les déplacements. Le choix des cas d'étude est crucial car il correspond à un nombre restreint d'espèces animales et de sites. Les caractéristiques de ces cas d'étude ont donc influencé la modélisation des comportements et l'implémentation des scénarios de simulation d'aménagements du territoire.

- Choix et caractéristiques des cas d'étude : espèces et sites

Le choix des cas d'étude a été une étape essentielle dans la démarche de recherche. Les cas d'étude représentent des informations récoltées sur le terrain, informations initialement descriptives et devant être interprétées. Nous avons souhaité pouvoir étudier plusieurs espèces

afin d'apprécier les variations dans les comportements et surtout dans les déplacements. Les cas d'étude dans la littérature sont souvent focalisés sur une espèce afin de pouvoir répondre à plusieurs questionnements sur leurs comportements (Netzer *et al.*, 2007). Le suivi sur le terrain d'une seule espèce est par ailleurs plus simple à mettre en œuvre pour des raisons de captures et d'observations similaires. Cela permet de réunir un plus grand nombre d'individus pour une espèce et d'obtenir ainsi des résultats statistiquement valables. Certaines études s'intéressent toutefois à plusieurs espèces et s'attachent à la comparaison de leurs comportements, comme dans Tablado *et al.* (2010) et Schmidt *et al.* (2009). Cette comparaison concerne alors des aspects précis tels que la forme des trajectoires ou l'utilisation de l'espace. Nous avons favorisé de même une approche interspécifique, même si cela supposait un nombre restreint d'individus. Les études sur les espèces concernent la plupart du temps un unique site d'étude afin de faciliter la mise en œuvre et réduire les biais dus au contexte environnemental lors de la comparaison des comportements. Cependant, nous avons souhaité pouvoir étudier des observations sur plusieurs sites, ceci pour une même espèce, afin de comprendre et de mieux prendre en compte les effets de plusieurs types de paysage. Les échanges avec les écologues et le partage de leurs données nous ont permis de disposer et d'interpréter des cas d'étude variés qu'il n'aurait pas été possible d'obtenir par nos propres moyens dans le laps de temps de la thèse. Les différentes sources d'observation sur la faune supposaient une diversité dans les spécifications des données. Cela nous a permis de comparer les différents types de données géoréférencées existantes sur la faune et de déterminer, en fonction de ces différences, quelles étaient les informations que l'on pouvait extraire sur le parcours de l'espace par les individus. De plus, les données ont été récoltées par les équipes dans des contextes propres. Ces contextes sont importants car ils définissent d'abord la forme des données et ils sont liés aux problématiques propres aux espèces concernées. Pour les suivis de renards de l'ELIZ et de l'Anses (Raton, 2004 ; Robardet, 2007), les localisations ont été récoltées dans le contexte de surveillance épidémiologique de l'échinococcose alvéolaire en milieux urbain et périurbain. La convention avec l'ONCFS (Saïd, 2009) a dirigé notre intérêt vers la gestion des cervidés dans les forêts françaises. Les questionnements de l'ONCFS portent non seulement sur les interactions entre les chevreuils ou les cerfs avec leur environnement, mais également sur les interactions possibles entre ces deux espèces. Le cas d'étude fourni par le CEFS de l'INRA (Morellet *et al.*, 2011) concerne de multiples aspects des déplacements du fait de la précision et de la taille de l'échantillon de données. Les déplacements ont pu être interprétés en fonction de leur type au vu de variables individuelles ou environnementales. Ces contextes montrent l'intérêt des suivis des déplacements d'animaux et de leur intégration dans l'étude des interactions entre la faune sauvage, leur environnement naturel et la société.

La détermination des cas d'étude a donc permis de nous renseigner sur les suivis passés et en cours des déplacements de la faune sauvage en France. Nous nous sommes rendue compte que les données de déplacements issues de systèmes GPS et VHF sont rares et précieuses car elles sont difficiles à récolter sur le terrain. Cela nous a amené à échanger avec des écologues spécialisés dans l'étude d'une ou plusieurs espèces et ayant une connaissance poussée de leurs comportements généraux dans le cadre des suivis sur des sites en particulier. L'exploitation des cas d'étude sur plusieurs espèces et plusieurs sites a mis en avant le fait qu'il est intéressant de disposer d'un grand nombre de données de localisations sur la faune. Ces localisations permettent de visualiser les trajets de déplacement qui peuvent ensuite être analysés et interprétés. Ces données contribuent à améliorer les connaissances sur les animaux et à mieux les intégrer dans les choix d'aménagement du territoire.

- Analyses de données et modélisation des déplacements et de l'espace

Il nous paraît important de souligner l'apport de la thèse dans l'approche globale définie pour atteindre les objectifs. La définition des étapes méthodologiques s'est appuyée sur la littérature. Nous avons pu adapter certaines méthodes à notre problématique et à nos cas d'étude. L'analyse des déplacements de faune, de piétons, de véhicules, utilise les trajectoires interpolées à partir de localisations connues (Calenge et al., 2009 ; Piombini, 2007 ; Palma *et al.*, 2008). Nous avons interpolé les trajectoires lorsque les localisations correspondaient à une fréquence temporelle suffisamment élevée ; dans le cas contraire, nous avons analysé les localisations ponctuelles. Nous avons cherché à identifier les éléments du paysage associés à des préférences spatiales des animaux ainsi que les éléments faisant probablement obstacle à leur déplacement. La méthodologie définie a pour objectif de valider ou de nuancer les hypothèses de départ sur les déplacements. Nous avons dans un premier temps analysé le voisinage spatial des localisations et des trajectoires reconstruites. Nous avons effectué des analyses descriptives de comparaison entre les compositions des sites d'étude, des espaces parcourus et de l'emplacement des localisations. Ces premières analyses ont eu pour but d'explorer le contenu des données et d'identifier les caractères de l'espace qui semblent jouer un rôle. Nous avons ensuite proposé une méthode de validation statistique des résultats en découpant l'espace par une grille régulière et en caractérisant ces cellules par le nombre de localisations et la composition en éléments du paysage. Cette approche statistique a permis de montrer quelles étaient les relations significatives entre les localisations des animaux et les éléments du paysage. Dans un second temps nous avons élaboré une modélisation des concepts afin de formaliser les comportements des espèces et les éléments du paysage. Nous avons défini un modèle de simulation de trajectoires d'animaux dépendant des contraintes spatiales et des contraintes propres aux espèces.
La méthodologie définie est générique. Sa mise en œuvre dépend néanmoins de la granularité des données utilisées, notamment la fréquence temporelle et la précision spatiale des localisations d'animaux ainsi que l'échelle des données géographiques. L'apport réside dans l'enchaînement des étapes : acquisition de connaissances sur les déplacements des espèces animales étudiées grâce à un état de l'art sur le sujet et à des analyses de données, puis modélisation et simulation de trajectoires qui intègrent les connaissances précédemment formalisées. Les résultats principaux de ces étapes sont présentés dans les points suivants.

1.2. La caractérisation de l'influence du paysage sur les déplacements de faune

Les analyses des déplacements ont permis de mettre en évidence les comportements généraux parmi les individus des différentes espèces animales. Les cas d'étude offrent la possibilité de décrire des comportements individuels même si nous avons cherché à dégager des tendances par espèce et par site. Nous avons fourni les résultats des analyses de données ainsi que des éléments d'interprétation dans le chapitre III. Nous revenons sur les conclusions principales.

- L'étendue et le rythme des déplacements

Les déplacements des animaux peuvent être associés à leurs rythmes de vie. Grâce aux données, nous avons pu identifier les rythmes quotidiens suivants :

- En milieu périurbain, les renards sont plus actifs en période nocturne qu'en période diurne. Ils vivent en effet dans un environnement comprenant des activités humaines importantes surtout pendant la journée. Pendant la nuit, les déplacements peuvent s'effectuer sur de longues distances (jusqu'à 10 km en une nuit) alors que pendant la journée, les déplacements observés sont nuls (repos) ou limités (quelques centaines de mètres).

- Les chevreuils et les cerfs en milieu forestier se déplacent régulièrement en alternant des phases d'activités notamment d'alimentation avec des phases de repos. Les deux espèces se déplacent de proche en proche sans sembler rejoindre une zone de refuge unique. Les cerfs se déplacent toutefois sur des espaces plus vastes que les chevreuils. Pendant 24 heures, la surface parcourue est estimée en moyenne à 2,5 km² par individu de cerf dans le site des Vosges alors qu'elle est estimée à 0,5 km² par chevreuil. Il est cependant difficile d'extraire un rythme commun aux journées tant les déplacements sont réalisés sur de petites distances, quelques dizaines de mètres environ pendant une durée de 15 minutes.

Les rythmes annuels ont pu être visualisés grâce au jeu de données des chevreuils à Aurignac :

- Des déplacements en dehors des domaines vitaux habituels sont alors observés pour les chevreuils. Il peut s'agir de déplacements d'exploration ponctuelle dans le temps, pendant quelques heures ou quelques jours. D'autres déplacements sur de grandes distances sont également possibles : c'est le cas des dispersions temporaires et des dispersions définitives vers un autre domaine de vie.

Nous avons pu identifier des rythmes quotidiens à partir de plusieurs sources de données, de manière probante pour les renards, moins pour les cervidés. Il paraît néanmoins raisonnable d'affirmer que les différences de déplacements entre les espèces ne sont pas uniquement dues aux particularités des sites d'étude.

- Les préférences en termes d'habitat

En complément de l'étude des trajets de déplacement, nous avons cherché à vérifier des préférences d'habitat, c'est-à-dire à analyser si la composition des espaces parcourus, assimilés ou non aux domaines vitaux, correspondait à des occupations du sol particulières. Ces analyses permettent d'identifier si certains types d'occupations du sol sont plus parcourus que d'autres, et dans ce cas représenteraient un intérêt pour les animaux. Les domaines vitaux des renards en milieu périurbain incluent des zones où le tissu urbain est moins dense qu'au centre-ville. Les occupations du sol correspondantes sont notamment : des parcs et des bois urbains, des zones commerciales et d'activités avec de grands parkings, des aires de triage et des voies ferrées, des zones résidentielles, des pistes d'aérodrome. Pour le cas des cervidés en milieu forestier, les chevreuils montrent une préférence d'habitat dans des peuplements à majorité de feuillus (chênaies et jeunes peuplements) et ils restent hors des peuplements de conifères. Les cerfs semblent moins sélectifs au niveau de leur parcours des différents peuplements, même si les espaces parcourus sont composés significativement de plus de forêts de feuillus (dans les jeunes peuplements puis dans les chênaies) que de conifères.
Nous avons pu identifier certaines préférences d'habitat à partir des localisations des animaux et de l'estimation de leurs domaines de vies. Ces préférences sont associées aux milieux et aux sites d'étude. Elles nous ont permis de prendre en compte des éléments du paysage minoritaires mais pouvant représenter un intérêt pour les animaux (parcs et jardins en villes). Les informations d'occupation du sol en milieu forestier ont permis de mettre en avant des caractéristiques générales comme la préférence pour les feuillus.

- La caractérisation du rôle des éléments du paysage sur les déplacements

Nous avons cherché à caractériser les éléments du paysage selon leur influence sur les déplacements, à savoir s'ils les favorisaient ou au contraire les freinaient. Pour cela, nous avons analysé le voisinage des traces reconstruites linéairement à partir des localisations GPS. Nous avons étudié la composition en éléments du paysage autour de ces traces selon un gradient de distance. Par cas d'étude, les résultats principaux sont :

- Pour les renards, les lieux parcourus peuvent représenter un intérêt en ressources alimentaires comme des parcs urbains et des zones résidentielles. Des bois et des jardins suscitent par contre un intérêt comme emplacement de gîtes de repos. Les éléments peuvent correspondre à des endroits commodes et dissimulés lors de déplacements. Par exemple, les animaux peuvent utiliser la végétation arborée ou les haies pour se déplacer. Ils peuvent aussi longer des voies ferrées dont les alentours sont peu occupés par les hommes. En comparant les compositions entre le voisinage proche et lointain des traces, nous sommes parvenue à la conclusion suivante : en milieu urbain et périurbain, les renards se déplacent préférentiellement dans les zones arborées et ils se tiennent éloignés des routes, notamment de celles avec un trafic important.
- Pour les chevreuils et les cerfs en milieu forestier, les zones de déplacements correspondent majoritairement aux forêts de feuillus. Des déplacements rapides pour les deux espèces peuvent avoir lieu également dans les peuplements mixtes et pour les chevreuils, dans les hêtraies peu exploitées en tant que ressources. Les pentes où stationnent les chevreuils sont majoritairement très faibles, moins de 5 degrés. Ils peuvent néanmoins se déplacer plus rapidement sur de fortes pentes. Les pentes parcourues par les cerfs ont une distribution proche de celle de la RNCFS de La Petite Pierre avec une majorité comprise entre 5 et 10 degrés. Les observations montrent également que les cerfs longent des routes forestières, sans doute par intérêt alimentaire (plantes herbacées) et par facilité de déplacement (milieu ouvert, zone plane).
- Pour les chevreuils en milieu agricole et boisé fragmenté, certains éléments semblent influencer les déplacements, même si nous n'avons pas pu effectuer d'analyses statistiques. Certains déplacements semblent ainsi dirigés le long de chemins ou de voies à faible trafic ainsi que le long de cours d'eau. Les routes de moyenne importance semblent par contre freiner les déplacements, ce qui peut être lié au fait que ces routes délimitent des champs cultivés ou des bois. Lors de déplacements sur plusieurs kilomètres en dehors des domaines de vie habituels, les grandes infrastructures de transport comme les autoroutes et les voies ferrées semblent arrêter les déplacements.

L'analyse de données a mis en évidence certaines préférences spatiales selon les espèces et selon les sites. À partir des localisations et des données géographiques existantes, nous avons pu identifier et confirmer les comportements de déplacements des espèces. Nous avons constaté que la plupart des hypothèses issues des analyses spatiales étaient confirmées par une approche statistique. Les tests statistiques ont permis de plus de distinguer les types de mobilité selon l'occupation du sol. Ces connaissances sont utilisées dans la modélisation pour mieux simuler les déplacements de faune et les effets des modifications du paysage.

1.3. L'apport de la modélisation et des simulations de trajectoires

- Le modèle de données

Nous avons proposé une modélisation des déplacements de la faune et de l'influence des éléments du paysage. Les déplacements sont modélisés à partir de la suite des localisations

ponctuelles. Ils sont segmentés en pauses et en déplacements rapides. Les déplacements sont effectués par un individu d'une certaine espèce animale et ayant des comportements propres. Nous avons souhaité représenter l'espace vécu par les espèces animales. Nous avons conceptualisé comment les éléments du paysage étaient vus par les individus en les caractérisant à partir de leur rôle sur les déplacements : les éléments d'intérêt qui motivent les déplacements, les éléments évités qui sont peu parcourus, les éléments favorables aux déplacements qui offrent un environnement adéquat pour se mouvoir ainsi qu'une visibilité faible, et les obstacles qui freinent les déplacements et modifient les trajets. Le modèle de données nous permet donc de formaliser le rôle de l'espace sur les déplacements.

- La simulation des trajectoires d'animaux

Nous avions pour objectif de proposer une simulation de trajectoires afin de pouvoir tester nos hypothèses concernant l'influence du paysage sur les déplacements ainsi que d'évaluer les conséquences d'aménagements. Nous avons proposé un modèle de simulation orienté agent. Dans notre cas, un agent est un individu appartenant à une espèce animale et son environnement est composé des éléments du paysage. Le modèle de simulation prend en compte les connaissances organisées dans le modèle de données défini : rôle des éléments du paysage, rythme de déplacement, et ceci selon le comportement par espèce. Nous avons implémenté ce modèle pour les trois espèces de nos cas d'étude et pour des déplacements quotidiens. Nous avons lancé des simulations de trajectoires sur les sites d'étude des observations. En comparant traces observées et traces simulées, nous avons vérifié si les rythmes de déplacements et les relations par rapport aux éléments du paysage étaient cohérents. Cette comparaison nous a permis d'ajuster certains paramètres de simulation comme le rayon de perception des éléments du paysage, qui n'est pas une valeur précisément quantifiée mais qui permet de représenter théoriquement la distance d'influence des éléments sur les animaux. Le processus de simulation étant non déterministe, le lancement de plusieurs trajectoires permet de mettre en avant certains lieux de déplacements privilégiés et d'autres peu propices. Les résultats sont réalistes par rapport aux déplacements observés. Cependant les rythmes de déplacements ne sont pas bien pris en compte dans notre modèle. En effet, nous avons davantage privilégié la recherche de lieux d'intérêt (ressources) que le repos car notre but est de visualiser où les individus se déplacent. Les distances réalisées et les espaces parcourus quotidiennement sont ainsi surestimés dans le modèle de simulation pour les trois espèces étudiées. De plus, les préférences spatiales des cervidés en fonction des types de peuplements forestiers et des pentes pourraient être améliorées.

- Les scénarios de projets d'aménagement

Il serait intéressant pour les aménageurs de disposer de méthodes pour prendre en compte les conséquences des projets en amont de leur réalisation. La simulation permet de lancer des trajectoires à partir de comportements modélisés alors que les observations sur la faune sont limitées en nombre car coûteuses en temps et en investissements humain et économique. Les trajectoires simulées permettent d'estimer l'impact d'aménagements par comparaison avec les trajectoires calculées sur l'espace réel. Nous nous sommes concentrée sur un test dans un site d'étude correspondant à des observations. Nous avons défini trois scénarios d'aménagement qui concernent la construction d'une route : la route seule, la route aménagée avec des passages à faune puis la route avec les mêmes passages à faune accompagnés d'un corridor écologique redéfinissant des connectivités entre des zones arborées. La comparaison avec l'espace de référence non modifié montre que les déplacements sont freinés par la route, de l'ordre de 10 %. Les passages à faune qui sont localisés sur le tronçon routier modifient peu son effet de barrière. Le corridor semble par contre pallier cet effet. Les déplacements sont répartis dans des

zones similaires à l'espace sans la nouvelle route. Cet exemple particulier illustre le fait qu'il est possible de traduire dans notre modèle l'influence positive ou restrictive des éléments du paysage. Le test mené sur l'ajout d'une infrastructure de transport indique que les aménagements locaux en faveur de la faune sont plus efficaces lorsqu'ils sont insérés dans un aménagement plus global du territoire comme un corridor écologique.

1.4. La pertinence des données géographiques dans la prise en compte des déplacements de faune

Un des objectifs de la thèse était de déterminer la pertinence des données géographiques à grande échelle dans la compréhension des déplacements de la faune. L'enjeu est d'identifier si les données de description de l'espace existantes sont suffisamment précises pour comprendre l'influence de l'espace sur les déplacements, et par la suite de tenter d'évaluer les conséquences d'aménagements. Quelques remarques sur leur pertinence sont énoncées ci-dessous.
Les données du RGE® correspondent à une échelle de représentation de l'ordre du 1 : 5000ème et sont de résolution métrique. L'originalité de notre approche a été de prendre en compte ces données géographiques et de les superposer avec les localisations d'animaux et les traces interpolées de déplacements. Nous avons cherché de manière systématique des relations spatiales entre les thèmes géographiques et les localisations connues. Nous avons tenté de reconnaître ce qui était significatif ou non dans le choix des trajets des animaux. Lors de la recherche de relations entre les localisations des animaux et les éléments du paysage, les informations sur les routes et chemins, les bâtiments, les zones arborées, l'hydrographie pouvaient expliquer certaines directions prises et certains comportements. Les informations intéressantes dépendent cependant des espèces animales, des sites d'étude et des thèmes géographiques.

- Les réseaux de transport : pour les routes et les chemins, les relations topologiques du réseau sont utiles afin d'estimer le nombre de traversées. Selon la répartition du type de routes dans le site d'étude, ces traversées peuvent être le signe soit de l'utilisation des routes comme des lieux de passage, soit d'un rôle d'obstacle. Dans les cas des renards en milieu périurbain, nous avons pu constater un certain évitement des routes notamment celles de grande importance. Les routes influencent également les déplacements et les domaines de vie des chevreuils comme cela a été observé sur le site d'Aurignac. Dans la RNCFS de La Petite Pierre, les cerfs utilisent les zones dégagées des bords de routes forestières peu fréquentées par les piétons et par les véhicules autorisés. Le type de routes ainsi que l'intensité du trafic sont des informations attributaires intéressantes car elles relativisent l'importance de leur rôle d'obstacle. Les voies ferrées sont des infrastructures pouvant être utilisées par certains animaux (par exemple les renards) car leurs bords sont peu occupés par les hommes et présentent ainsi des dérangements moindres. Leur tracé pourrait être complété par une description des bas-côtés au niveau des aménagements (grillages, passages) et des occupations du sol (friches, revêtement).
- Le bâti : les bâtiments sont denses en zones urbanisées (les trois sites des renards), beaucoup moins en milieu agricole (chevreuils à Aurignac) et quasiment absents dans la RNCFS (suivis des cervidés à La Petite Pierre). Les informations sur la fonction des bâtiments sont peu pertinentes s'il s'agit de bâtiments d'administration. Cependant ces informations sont utiles à l'interprétation des déplacements s'il s'agit de bâtiments correspondant à une occupation du sol particulière. Par exemple les bâtiments commerciaux ou industriels sont intéressants à considérer car nous avons constaté que les renards se déplaçaient dans ces zones d'activités, à proximité de ces types de bâtiments.

- Les surfaces d'activités : les zones importantes d'activités sont incluses dans le RGE®. Elles fournissent de précieuses informations sur les types d'occupation du sol et offrent un niveau de détail supplémentaire à la description de l'espace. En plus des éléments topographiques, les surfaces d'activités correspondent souvent à des activités humaines propres. Cela peut correspondre à de faibles dérangements, comme par exemple pour une zone industrielle ou un centre équestre avec beaucoup d'activités pendant la journée et moins à l'aube et au crépuscule ainsi que la nuit (période d'activité des renards).

- La végétation arborée : ces données sont précises géométriquement. Sans la distinction des types d'essences composant les zones arborées, nous avons pu identifier que les renards les utilisaient préférentiellement en milieu périurbain notamment en période diurne pour l'emplacement des gîtes de repos. La caractérisation des occupations du sol correspondant à des zones arborées serait intéressante à inclure automatiquement dans les analyses : par exemple la distinction entre des jardins privés, des parcs ou des zones de friches. Pour les renards, les zones arborées semblent parcourues lors de déplacements rapides, cette préférence restant toutefois à confirmer par d'autres observations. Les structures linéaires de végétation comme les haies arborées ou arbustives et les alignements d'arbres, sont des éléments reconnus comme intéressants pour les déplacements de la faune. La caractérisation des haies est pertinente sur les sites d'étude urbanisés et agricoles. Nous n'avons par contre pas relevé de préférences pour les haies dans le cas des renards. Dans le cas des chevreuils à Aurignac, certains déplacements s'effectuent en fonction de ces haies, ce qui peut confirmer une utilisation à des fins de déplacement ou d'exploitation (alimentation). En milieu forestier, il n'y a pas de distinction de structure de végétation dans le RGE®. La base Carte Forestière permet par contre de préciser les préférences de présence des cervidés dans les mélanges de feuillus en particulier les jeunes peuplements et les chênaies, mais leur évitement des hêtraies. Il serait alors intéressant de réaliser une cartographie plus précise des types d'essences forestières. La connaissance des essences d'arbustes et de plantes herbacées serait utile pour déterminer les lieux précis de ressources motivant les déplacements.

- L'occupation du sol : en dehors des éléments topographiques et des surfaces d'activités, l'occupation du sol agricole ou prairial n'est aujourd'hui pas décrite dans la BD TOPO®. En milieu urbanisé où le renard est la seule espèce suivie, les données de la BD TOPO® en ville couvrent une grande majorité de l'occupation du sol car les densités des routes et des bâtiments sont importantes. Par contre à la frontière entre les milieux périurbains denses et ceux peu denses, les informations sur les prairies et les champs cultivés sont très utiles car ceux-ci sont exploités par les renards pour leurs populations de micromammifères. Les données du Registre Parcellaire Graphique sont, à ce titre, intéressantes, et nous les avons utilisées à partir du Géoportail pour l'interprétation de certaines localisations. La base de données CORINE Land Cover fournit également la cartographie des natures d'occupation du sol à moyenne échelle. Cette base s'est révélée adaptée dans le cas d'étude sur les chevreuils à Aurignac. En effet, certains déplacements sont effectués sur plusieurs kilomètres et les espaces occupés correspondent à aucune occupation du sol de la BD TOPO® (cultures par exemple). La base CORINE Land Cover a permis également de définir des préférences d'habitat dans les trois cas d'étude sur les renards. Une plus grande précision spatiale est toutefois pertinente afin de déterminer de manière plus significative des préférences au niveau des lieux de déplacements. L'IGN étudie actuellement l'enrichissement de sa couche d'occupation du sol sur l'ensemble de la France. Cette base de données d'occupation du sol décrira la végétation non arborée au 1 : 25 000ème. Elle est en phase de test par le projet CarHAB sur la cartographie nationale des habitats et elle est en coordination avec les réalisations du projet européen MS_MONINA (Corbane *et al.*, 2013). La disposition de ces données complèterait utilement les éléments topographiques de la BD TOPO® actuelle. Des éléments du paysage avec des étendues spatiales limitées comme des arbres isolés, des haies,

des bandes herbeuses, sont par exemple cartographiés dans la base de données ECOLINE (Boucher & Cauchetier, 2012) qui donne ainsi des informations précieuses pour caractériser la connectivité du paysage et identifier les habitats des espèces animales. L'intérêt de saisie dans les bases de données de ces éléments ponctuels et linéaires du paysage est aussi indiqué dans Raap (2013).

- Les autres éléments déterminants : nos observations sur le terrain nous ont permis de nous rendre compte que certains éléments non présents dans la BDTOPO® pouvaient expliquer certains détours par les animaux. Ceci est vérifié en milieu urbain, par exemple sur le site de Nancy où des clôtures et des grillages peuvent freiner les renards. Les murets accompagnés ou non de grillages qui entourent les jardins, les parcs ou des lieux d'activités (terrains de sport par exemple), semblent influencer logiquement l'orientation des déplacements. Nous nous sommes aidée des photographies aériennes afin de mieux visualiser ces éléments, même si les grillages sont difficiles à percevoir et qu'ils nécessitent une observation par un travail de terrain. Ces éléments peuvent diminuer la perméabilité des éléments du paysage, c'est-à-dire leur possibilité d'être traversés ou parcourus par la faune. Leur amélioration représente un des enjeux des mesures de restauration des continuités écologiques (COMOP TVB, 2010).

Nous avons pu, à partir des bases de données du RGE® (IGN) et d'autres sources comme la base européenne CORINE Land Cover, identifier des préférences spatiales des animaux, dans leurs habitats et lors de leurs déplacements. La base Carte Forestière V2 (IFN et à présent IGN) n'est disponible que sur quelques départements mais elle précise les essences forestières, ce qui a permis de mieux connaître la sélection opérée par les espèces animales en milieu forestier. La cartographie de l'occupation du sol à grande échelle serait une source de données pertinente qui permettrait de préciser certains comportements. De même que lors de l'analyse des trajectoires d'animaux, l'utilisation des bases de données est idéalement complétée par des observations sur les terrains d'étude afin de ne pas manquer les éléments de l'environnement qui pourraient être significatifs dans le choix des chemins empruntés. Ces éléments concernent aussi bien ceux qui favorisent a priori les déplacements (haies) que ceux qui les bloquent (grillages). Nous notons une certaine adéquation entre la précision spatiale des données de description de l'espace et des données sur les déplacements de la faune. La fréquence temporelle des enregistrements de localisations des animaux n'est pas assez élevée pour identifier précisément quels sont les lieux de passage. Dans nos cas d'étude, les points GPS sont d'une précision supérieure au mètre et ils sont séparés au minimum par un intervalle de 5 minutes, ce qui par exemple ne permet pas d'identifier à quel niveau un animal traverse une route. Le niveau de détail géométrique des bases de données à grande échelle demeure plus cohérent pour l'étude des préférences spatiales et l'estimation du rôle de barrière des éléments que pour l'étude précise des chemins empruntés.

1.5. L'implémentation du module informatique

Nous nous étions fixé l'objectif de développer un module informatique pour réunir les fonctions d'analyse et tester les simulations de trajectoires s'appuyant sur notre modèle de données. Nous avons implémenté un prototype permettant la visualisation, l'analyse et la simulation des déplacements d'animaux et des données géographiques. Ce module s'appuie sur des bibliothèques existantes et est intégré à la plateforme open source GeOxygene développée au laboratoire COGIT de l'IGN. Nous n'avions pas pour but de recréer un logiciel mais d'offrir un environnement pour la mise en œuvre de notre approche. Ce module devait être adaptable pour répondre aux analyses des différents cas d'étude. Les données de déplacements n'ont pas les mêmes spécifications et la même fréquence selon les suivis des espèces animales, ce qui a

nécessité des traitements particuliers. Le module a donc été développé dans l'optique d'être modulable en fonction des données disponibles, des comportements des espèces et du type d'espace. La modularité concerne aussi la simulation. Les simulations reposent sur le modèle qui reste générique et dont il est possible de spécialiser les comportements de déplacements selon les espèces et les espaces. En plus des fonctions implémentées dans GeOxygene, nous avons eu recours à d'autres logiciels : le SIG QGIS pour les analyses de données et le logiciel de statistique R pour tester la significativité de certains résultats, exploiter les fonctions d'interpolation de points et créer des représentations graphiques adaptées. Nous avons en particulier développé les aspects suivants.

- La lecture et la visualisation des données de déplacements et des bases de données géographiques :

La cartographie des données a permis de mettre en évidence certaines influences spatiales sur les déplacements, notamment la représentation de la composition des espaces parcourus, et des préférences d'occupation du sol chez les animaux. La visualisation concerne également les résultats de traitements ou d'analyses pouvant être mis en évidence par des choix sémiologiques. Une visualisation 3D a été réalisée dans GeOxygene et la plupart des visualisations 2D dans QGIS.

- L'analyse des déplacements et des relations entre espace et déplacements :

De même que pour la cartographie, des prétraitements sont nécessaires comme l'homogénéisation des formats et la sélection des données et des résultats les plus intéressants. Nous avons développé les méthodes d'analyse en langage Java en nous appuyant sur le modèle de données de GeOxygene. Nous avons également utilisé QGIS et PostGIS pour certaines analyses spatiales, comme la fusion de certaines données, ou des opérations simples de sélection de données selon des critères spatiaux.

- Le paramétrage et le lancement de simulation de trajectoires. Ces trajectoires visualisées dynamiquement sont enregistrées dans une base PostGIS. Le modèle de données générique est implémenté. Le processus de simulation s'appuie sur une modélisation orientée agent dont nous avons également implémenté les classes génériques. Les fonctions de simulation sont elles-mêmes développées à partir de ce modèle afin de créer des objets trajectoires point par point en prenant en compte les données géographiques caractérisées selon leur influence et les comportements de déplacements des espèces (alternance des phases d'activités, vitesse moyenne).

Outre le développement des fonctionnalités dans GeOxygene, leur accès à partir d'une interface graphique nous a paru important (cf. Figure IV.24). Cette interface permet de parcourir les fonctionnalités développées, de les démarrer et si besoin, de modifier les valeurs de leurs paramètres. Elle répond à une simplicité dans l'utilisation. La physionomie de l'interface graphique pourrait cependant être améliorée et des menus d'aide pourraient être intégrés. L'implémentation de certaines analyses de données adaptées à nos objectifs d'étude a permis de faciliter la recherche des relations entre l'espace et les déplacements de la faune. L'implémentation du modèle de données et du processus de simulation agent dans GeOxygene a également permis de développer des fonctions modulables de construction de trajectoires. Nous avons pu tester certaines hypothèses en comparant les résultats de simulation avec les déplacements observés. La définition et le test de scénarios d'aménagements du territoire ont été possibles en modifiant l'environnement spatial des agents. La Figure Conclusion.1 présente les fonctions utilisées et les développements réalisés au cours de la thèse afin de répondre aux objectifs.

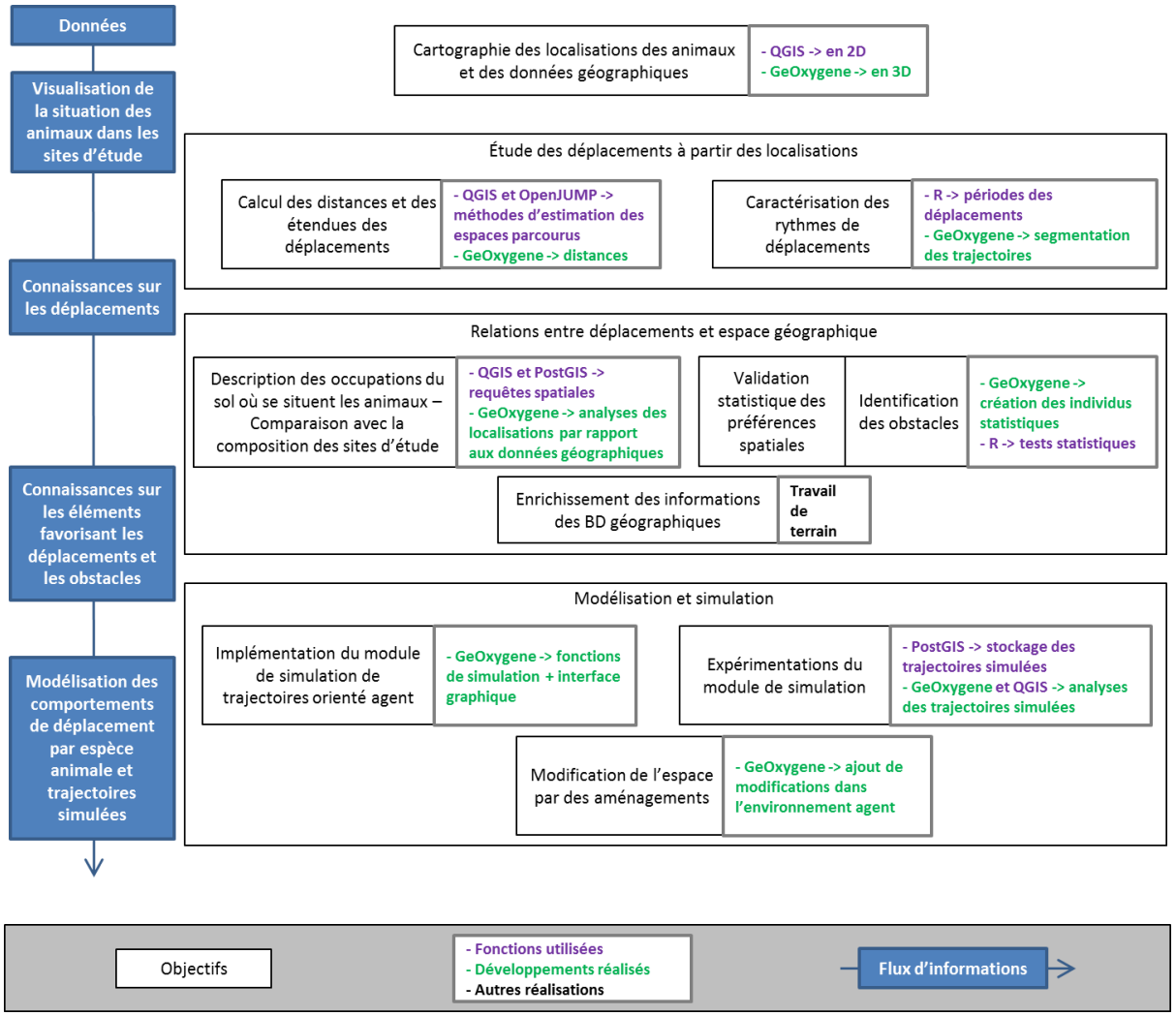


Figure Conclusion.1. Les réalisations de la thèse : les données et les résultats obtenus à partir de fonctions existantes et des développements.

2) LES PERSPECTIVES DE LA THÈSE

Notre problématique concernait la caractérisation de l'influence de l'espace sur les déplacements d'animaux en utilisant les sources de données géographiques à grande échelle. Nous avons eu l'opportunité de travailler avec des écologues et de disposer de leurs données de suivi de différentes espèces animales. Nous avons pu aboutir à certaines conclusions sur les relations entre éléments du paysage et déplacements, puis nous avons mis en œuvre un modèle de données et de simulation de trajectoires et d'aménagements. Cette mise en œuvre peut être complétée par des analyses et des tests supplémentaires. Nous énonçons dans cette partie les perspectives de développements que nous aimerions apporter à notre approche, ainsi que les perspectives plus générales concernant les applications du modèle proposé et les recherches se rapportant à la problématique de la thèse.

2.1. Les améliorations possibles de l'approche proposée et des méthodes développées

Nous exposons les perspectives dans la continuité des développements que nous avons réalisés. Nous avions défini une approche en début de thèse ainsi que des étapes méthodologiques pour y répondre, sans connaître a priori les conclusions que nous allions obtenir. Au fur et à mesure de l'obtention des résultats, nous avons orienté certaines analyses et certains tests. Nous pouvons enrichir ces méthodes et en appliquer de nouvelles. Nous présentons les perspectives selon les thèmes correspondant aux étapes d'analyse, de simulation et de visualisation. Ces perspectives portent sur les données existantes de nos cas d'étude.

- Compléter l'identification des préférences spatiales et la caractérisation des obstacles et des corridors de déplacement

- La chronologie de la disponibilité des données de la faune a influencé notre approche dans les analyses spatiales des déplacements. Dans les trois cas d'étude des renards et dans ceux des cervidés en milieu forestier, le nombre d'individus suivis est restreint, entre 3 et 8 par cas. Nous avons donc pu analyser les déplacements par individu et les comparer entre eux qualitativement en faisant ressortir les similitudes et les différences entre les individus et entre les espèces. Les thèmes principaux de la BD TOPO® ont été analysés dans le voisinage des localisations et des traces linéaires afin d'extraire des différences significatives entre ce qui est proche et ce qui est éloigné des animaux. Une perspective dans la recherche de l'influence des éléments du paysage est de préciser l'environnement spatial des animaux. Par exemple, au lieu de calculer la surface des zones arborées, nous pourrions caractériser leur connectivité. La situation relative des zones arborées entre elles peut être intéressante. Par exemple, un animal n'est pas observé à l'intérieur d'une zone arborée mais il peut être entouré par de la végétation, ce qui lui permet de se déplacer avec peu de visibilité de l'extérieur. Après avoir analysé séparément les thèmes issues de la BD TOPO®, nous pourrions chercher à caractériser pour chaque localisation, la situation des différents éléments du paysage à proximité les uns par rapport aux autres. Certaines corrélations entre les éléments du paysage pourraient être utiles à rechercher, par exemple entre le réseau routier, la répartition des bâtiments et celles des zones arborées. Ces analyses demandent une prise en compte plus exhaustive des éléments du paysage impliqués dans les choix de déplacements.

- Nous avons supposé que les obstacles aux déplacements étaient assimilables à une fréquence faible de parcours de certaines occupations du sol et à un faible nombre de traversées d'infrastructures linéaires comme les voies de transport. Une des perspectives serait de préciser la forme de la trajectoire estimée en fonction du voisinage spatial. Nous avions effectué une détection des changements de direction par rapport à ces éléments, qui ne s'est pas révélée significative (non présentée dans les résultats). Il serait peut-être intéressant de caractériser les changements de direction dans leur chronologie par rapport à la sinuosité des trajectoires. Cela suppose de réaliser une autre segmentation que celle que nous avons proposée. En effet, nous avions segmenté la trajectoire en fonction des distances entre les localisations afin de détecter des pauses et des déplacements rapides. Une seconde segmentation peut concerner le degré de sinuosité, lié aux distances estimées et aux durées. L'objectif est ensuite de tenter de relier cette sinuosité aux éléments du paysage à proximité. Ceci représente une piste de recherche pour détecter les obstacles ainsi que les éléments facilitant les déplacements.

- Les méthodes d'analyse des déplacements telles que nous les avons développées dans GeOxygene à partir des premiers cas d'étude sont adaptées à des volumes de données restreints. Nous avons pu lancer nos fonctions d'analyse pour le cas des chevreuils à Aurignac dont nous avons disposé en fin de thèse. Cependant, le chargement des données géographiques a dû être optimisé car les localisations des individus correspondaient à plusieurs mois et les surfaces concernées étaient plus grandes que dans les cas d'étude précédents. Par rapport aux analyses des déplacements quotidiens, le jeu de données d'Aurignac nous a permis de visualiser des déplacements sur de grandes distances et de nous rendre compte de la diversité des occupations de l'espace par les différents individus. Les analyses spatiales sur les déplacements des chevreuils à Aurignac peuvent largement être complétées. Nous pourrions poursuivre l'analyse comparative entre l'espace autour des déplacements et le domaine vital estimé afin de mettre en avant une sélection par les animaux dans les lieux empruntés. Nous n'avons pas analysé l'ensemble des déplacements et des thèmes géographiques mais nous avons extrait certains déplacements qui semblaient être influencés par certains éléments du paysage. Au vu de l'exhaustivité de l'échantillon de données et de la durée du suivi, il semble pertinent de définir des tests statistiques pour identifier si certains éléments sont significativement déterminants dans les déplacements.

- Préciser les types de déplacements dans les recherches de relations

- Dans le cas d'étude d'Aurignac, plusieurs types de déplacements sont observés. Nous avons proposé une méthode d'extraction des déplacements en dehors du domaine vital habituel. Ces déplacements correspondent soit à des imprécisions de localisations soit à des déplacements exploratoires sur des distances plus ou moins grandes. Il serait utile de catégoriser automatiquement ces déplacements exceptionnels : migrations définitives, migrations temporaires, déplacements exploratoires brefs. Cette catégorisation pourrait s'accompagner d'une caractérisation de la forme des trajectoires et des éléments du paysage rencontrés. Il serait possible de comparer l'environnement spatial et le rythme des déplacements exceptionnels à ceux des déplacements quotidiens.

- Nous avions mentionné le fait que les déplacements des animaux pouvaient être différents à la suite de leur capture. L'étude réalisée par Morellet *et al.* (2009) indique un évitement des sources de dérangements humains et la pratique privilégiée d'un milieu fermé après la capture. Nous pourrions étudier si un comportement différent est bien détecté suite à la capture, uniquement à partir des zones arborées décrites dans la BD TOPO®. Plus généralement, il faudrait déterminer s'il est possible de détecter des différences entre les déplacements en

fonction de l'époque de l'année. Nous nous sommes posée cette dernière question pour le cas d'étude sur les cervidés de La Petite Pierre mais les données étaient trop peu nombreuses pour formuler une conclusion.

- Estimer l'incertitude des localisations et proposer des interpolations des trajectoires

- Un des problèmes dans l'analyse des trajectoires est la détection des imprécisions de localisations. Nous avons détecté les localisations imprécises qui étaient les moins ambigües à partir des distances entre les localisations successives et en nous aidant des informations fournies sur la qualité du signal satellite ou radio. Il est cependant probable que des localisations imprécises ne soient pas supprimées par cette méthode. Il pourrait être intéressant d'évaluer la précision des localisations en fonction de l'environnement spatial. Les trajectoires pourraient être reconstruites en fonction de cette précision afin d'estimer quelle est la probabilité que l'animal ait emprunté tel ou tel chemin.

- Nous avons interpolé les trajectoires linéairement à partir des localisations enregistrées. L'interpolation des trajectoires fait l'objet de recherches car elle permet également de tester certaines hypothèses sur les choix de chemins en comparant les résultats d'interpolation avec des observations à grande fréquence temporelle et donc proches des trajets réels. Les interpolations non linéaires supposent d'émettre des hypothèses sur le comportement de la faune concernant la forme des déplacements et l'influence des éléments du paysage. Cela suppose de disposer au préalable de certaines connaissances acquises par la littérature, les observations et les analyses de données. La reconstruction de trajets continus entre les points connus peut s'appuyer sur une description de l'espace caractérisé : élément non traversable, obstacle, corridor. La prise en compte des éléments du paysage peut s'effectuer à partir d'équations différentielles (Morellet & Goulard, 2012) et il serait intéressant de comparer les différentes hypothèses émises à partir de la description de l'espace des bases de données géographiques que nous avons utilisées. Dans l'étude des déplacements, il serait intéressant d'augmenter les fréquences temporelles des enregistrements de localisations afin de déterminer exactement par où passent les animaux. Cela pourrait permettre de s'assurer que les animaux empruntent bien certains éléments du paysage ou s'ils sont déviés par d'autres.

- Prendre en compte l'espace et sa description dans les bases de données

- Nous avons effectué quelques traitements sur les données géographiques afin de les rendre plus cohérentes. C'est par exemple le cas avec la construction topologique du réseau routier pour analyser les traversées des voies nécessaires par les animaux. Nous avons considéré les routes comme des tronçons linéaires en exploitant principalement les informations sur leur type et sur l'intensité du trafic. Nous pourrions les considérer comme des surfaces en utilisant l'information sur la largeur et voir si les résultats sur les distances aux routes sont modifiés. Il serait pertinent de décrire la forme des bas-côtés (talus, fossé, présence de grillage). Pour les analyses statistiques à partir de la grille, nous avons d'ailleurs considéré les routes et les cours d'eau comme surfaciques. Une étude de la connectivité des zones arborées serait utile, par exemple à partir d'un critère de distance maximale. Cela permettrait de visualiser des continuités de végétation et de préciser le voisinage des localisations des animaux.

- La prise en compte de l'espace a été effectuée par thème géographique selon les contours des éléments du paysage. Les fonctions de coût de déplacement permettent d'agréger l'information concernant l'influence du paysage et de visualiser ainsi des chemins potentiels pour les animaux. Cette approche réduit la précision spatiale de la description des éléments du

paysage ; elle donne néanmoins une cartographie synthétique de l'espace tel qu'il peut être perçu par les animaux.

- Enrichir le modèle de simulation

- Comme mentionné ci-dessus, nous avons utilisé les données géographiques à grande échelle avec définition du contour des éléments pour définir l'environnement de notre modèle de simulation agent développé dans GeOxygene. Nous avons proposé deux méthodes de construction de trajectoires : une fonction par projetés de rayon prenant en compte la géométrie des objets et une fonction d'intérêt au déplacement équivalente sur le principe à une fonction de coût. Nous avons principalement utilisé la première fonction qui permet à l'agent de contourner précisément les éléments du paysage. Il serait cependant intéressant de revoir la seconde fonction en améliorant la résolution spatiale du découpage de l'espace utilisé pour calculer l'intérêt d'une direction.

- Une perspective dans l'implémentation est de développer notre modèle de données et le processus de simulation dans un logiciel de systèmes multi-agents. Nous avons implémenté une partie de notre modèle de données dans le logiciel de SMA Cormas (voir le chapitre IV-5.1.3). La modélisation de l'espace est réalisée selon une grille, comme dans l'approche par automate cellulaire utilisée notamment par La Morgia *et al.* (2011) sur la dispersion des cerfs. Les tests ont été uniquement effectués pour le renard et seraient à compléter avec les comportements des deux autres espèces étudiées, chevreuil et cerf. Le logiciel Cormas étant plutôt dédié à l'étude des écosystèmes, une perspective serait également de développer notre modèle dans un logiciel qui puisse lire les données géographiques, couplé à un SIG comme le logiciel Gama. Une comparaison pourrait être effectuée entre les trajectoires obtenues à partir des mêmes comportements par deux implémentations différentes associées à des modélisations particulières de l'espace.

- Poursuivre la collaboration avec les écologues et tester d'autres comportements de déplacements dans le processus de simulation

Les résultats de trajectoires simulées s'appuyant sur notre modèle s'éloignent par certains aspects des déplacements observés. Une meilleure prise en compte des comportements des espèces serait nécessaire. Une des étapes dans l'analyse des résultats de simulation est la validation par les écologues de la cohérence des trajectoires construites. Nous avons eu quelques retours (chapitre IV). Il serait pertinent d'intégrer les pistes d'améliorations émises par les écologues, notamment sur la prise en compte plus précise des probabilités de parcours dans les différents types d'occupations du sol (communication orale, Sonia Saïd). L'enrichissement peut concerner la forme des déplacements et la prise en compte des éléments du paysage dans les déplacements. En voici deux exemples :

- Nous avions proposé deux implémentations dans la construction des trajectoires point par point. Une implémentation utilise la vitesse de déplacement pour déterminer la distance entre les points, l'autre exploite les distances et les angles relatifs estimés à partir des observations. Nous pourrions développer une méthode reposant sur des distributions probabilistes des caractéristiques de la forme des trajectoires. Il serait certainement pertinent de s'inspirer des comparaisons avec les simulations par vols de Lévy ou par modèle de mouvement brownien décrites dans la littérature (Chetkiewicz *et al.*, 2006, et voir l'état de l'art en chapitre I). Nous avons mentionné le fait que les espaces parcourus quotidiennement par les agents dans notre modèle de simulation étaient surestimés en surface. Nous avions privilégié les phases de déplacement plutôt que les phases de repos afin de visualiser les chemins empruntés. Nous pourrions alors représenter plus correctement les rythmes d'activités propres aux espèces

animales pendant une journée afin d'ajouter du réalisme aux déplacements. Concernant les déplacements sur de grandes distances (type migration ou exploration), nous avons fixé des destinations afin de forcer l'agent à se diriger vers un lieu d'intérêt fixé. Ceci nous permet de visualiser et de comparer les lieux de passage. Cependant l'appréhension des éléments du paysage n'est pas modifiée en fonction des étendues des déplacements, à l'intérieur ou à l'extérieur d'un domaine vital cohérent. Cela reste une possibilité d'enrichissement des comportements pris en compte dans le modèle.

- Le rôle et l'importance des éléments du paysage dans l'environnement spatial agent ont été fixés par espèce et par type d'élément. Les observations tendent toutefois à montrer que selon les individus et les sites d'étude, un même type d'élément du paysage peut jouer des rôles différents. Nous avons attribué aux routes un rôle de frein aux déplacements à cause du trafic et aussi à cause des bas-côtés qui pouvaient être aménagés et faire obstacle. Un rôle d'attraction des routes sur les animaux pourrait être modélisé de plusieurs façons : par exemple en associant un intérêt aux routes en fonction de conditions sur leur contexte spatial (une route au milieu d'une forêt peut être plus propice à la proximité et aux traversées des animaux qu'une route en ville, selon les espèces), ou alors en complétant les bases de données avec des informations supplémentaires (structures et essences végétales spécifiques en bord de routes par exemple). Le rôle des éléments du paysage pourrait également être modifié selon la variable temporelle : le trafic routier est généralement moins dense en pleine nuit que pendant les heures de la journée. Il en est de même pour les lieux d'activités humaines.

- Évaluer et compléter l'interface graphique du module développé

Le prototype que nous avons développé pour la visualisation, l'analyse et la simulation des déplacements de faune inclut une interface graphique d'accès et de paramétrage des traitements. Cette interface est dédiée à la manipulation par un utilisateur sans que celui-ci n'ait besoin de lire ou de modifier le code informatique. Nous n'avons pas réalisé de tests auprès d'utilisateurs pour estimer la facilité de maniement et la compréhension des fonctions proposées. C'est logiquement l'étape suivante afin d'évaluer cette interface et de l'améliorer.

- Proposer de nouvelles représentations cartographiques des résultats

- La plateforme SIG GeOxygene permet de représenter en vue 3D les données géographiques et les déplacements. L'affichage des données peut être modifié en fonction de la symbolisation des données et des paramètres d'éclairage. Afin d'augmenter le réalisme des scènes, des textures peuvent être appliquées aux données ainsi que de pictogrammes, comme dans Hehl-Lange (2001). La partie dynamique de l'affichage des trajectoires peut être complétée. Le suivi dynamique des déplacements actuellement possible à partir des objets trajectoires pourrait être plus fluide (par exemple au niveau des virages) et en correspondance avec la forme du terrain (moins de mouvements saccadés). Une interface graphique de réglage vidéo pourrait être ajoutée pour le réglage de la vitesse de déplacement notamment ou du changement de point de vue.

- Dans nos cas d'étude, nous avons pu constater que la visualisation seule des localisations des animaux ne suffit pas à comprendre les rythmes de déplacement et extraire des préférences spatiales. L'extraction des dynamiques de déplacements et des relations spatiales est nécessaire pour comprendre les localisations. Des indices sur les déplacements pourraient alors être définis pour cartographier de manière plus lisible les informations sur les déplacements. Les informations pourraient être présentées dans une interface de visualisation (par exemple une interface interactive et multivue comme dans Davoine *et al.*, 2012). Le problème de la visualisation d'un grand nombre de trajectoires se pose également pour les résultats de simulation. Afin de faciliter la lecture des informations contenues dans ces trajectoires, une

proposition pourrait être relative à une cartographie adaptée résumant les caractéristiques de ces trajectoires et de leurs relations aux éléments du paysage.

2.2. Les perspectives d'applications et de recherches

Dans cette partie, nous nous détachons de nos analyses et de notre modèle de données. Nous émettons des perspectives dans le cadre de la problématique de la thèse, à la fois en recherche et en applications. Ce sont des perspectives sur le long terme.

- Les perspectives en connaissances sur les déplacements

- Nous n'avions pas pour objectif d'améliorer les connaissances sur les déplacements d'animaux mais nous souhaitions qualifier l'apport des données géographiques à grande échelle dans leur compréhension. Notre modèle de simulation de trajectoires prend en compte des comportements d'animaux qui sont simplifiés et dont certains paramètres sont difficiles à quantifier, comme un rayon de perception par exemple. De nombreuses questions se posent sur les déplacements de la faune, questions qui peuvent avoir des réponses partielles à partir d'observations et de suivis. Une meilleure connaissance des déplacements des animaux apporte une meilleure compréhension du comportement des espèces, de leurs besoins et de leurs capacités. Dans des territoires sujets constamment à des modifications notamment sous l'influence anthropique, les animaux peuvent s'adapter en se déplaçant entre un habitat d'origine modifié et un habitat plus favorable. Nos cas d'étude comportaient un nombre restreint d'individus et un nombre de jours limités. Un nombre plus important de données sur les déplacements permettraient de mieux vérifier les hypothèses sur l'influence de l'environnement spatial sur les animaux.

- Les distinctions des différents types de déplacement constituent une approche valable. Il est en effet intéressant d'effectuer des comparaisons plus précises entre ces types de déplacements et d'identifier les différences de réaction des animaux face aux éléments du paysage d'une part dans un domaine de vie connu et d'autre part dans une zone explorée. Il n'est pas évident de quantifier quelle est la valeur réelle d'obstacle d'un élément pour un animal et quelle est l'importance de zones de corridor entre des taches d'habitat favorable. Un obstacle peut limiter l'étendue des domaines vitaux alors qu'il peut être franchi sous une pression par un individu. L'appréhension des éléments du paysage n'est certainement pas la même si les déplacements sont réalisés sur de courtes ou sur de longues distances. Cette distinction permettrait de mieux adapter la prise en compte des besoins des individus en termes de configuration paysagère, lors des mouvements quotidiens et plus exceptionnels. Cela permet également d'évaluer les capacités d'adaptation des espèces à leur environnement et la vitesse des adaptations.

- L'enrichissement des bases de données géographiques existantes

- Une saisie homogène de la description de l'espace selon des spécifications similaires est coûteuse à mettre en place. La question de l'enrichissement des bases de données géographiques pour l'étude des déplacements de la faune s'appuie sur le fait que certains éléments du paysage non présents dans les bases peuvent jouer un rôle. Leur absence peut mener à une incompréhension ou à une interprétation partielle des choix de direction et des préférences spatiales. Pour la simulation de trajectoires, la question est d'identifier si la prise en compte de nouveaux éléments produit des résultats plus réalistes. Dans des sites d'étude limités en superficie, le repérage sur le terrain d'éléments potentiellement influents pour les animaux reste possible ainsi que la saisie numérique à partir d'images aériennes. Pour des zones

beaucoup plus vastes de l'ordre d'une région, il peut être judicieux d'avoir recours à d'autres sources de données disponibles comme les images satellites (Lang & Blonda, 2013). Nous avons utilisé les bases de données du RGE® incluant la BD TOPO® et des photos aériennes pour les analyses des déplacements et leurs interprétations. Nous avons émis quelques remarques sur l'apport possible de la prise en considération de certains éléments topographiques : les clôtures ou les grillages ainsi que les éléments délimitant des propriétés et pouvant freiner les déplacements. Les aménagements des bas-côtés des routes pourraient être précisés dans les bases. En effet les bords de routes peuvent contenir des talus, des fossés, une végétation particulière pouvant faire obstacle ou au contraire favorisant la présence d'animaux. La modélisation en 3D pourrait être complétée sur la structure des infrastructures routières et plus largement de transport. De même, les caractéristiques des passages à faune influencent leur utilisation par certaines espèces, d'où l'intérêt de leur modélisation précise. En ville, les bords des voies peuvent être des trottoirs qui sont des espaces ouverts avec peu d'endroits pour se cacher mais qui peuvent contenir des éléments intéressants pour certaines espèces d'animaux comme des plantes spécifiques. Dans un milieu peu urbanisé où sont présents d'autres espèces animales, l'enrichissement de la description des essences de végétation serait pertinent (par exemple dans nos cas d'étude pour les cervidés). La cartographie des prairies et des cultures apporterait de même des informations sur les motivations aux déplacements.

- Des paramètres de l'environnement spatial seraient certainement utiles à considérer afin d'améliorer l'interprétation et la prise en compte des déplacements de faune. Ces variables sont par exemple le bruit pouvant être modélisé par un taux de dérangement sonore pour les animaux, ou encore les sources de lumières artificielles. Cela suppose l'utilisation de bases de données non topographiques et de nouvelles analyses en lien avec les localisations de la faune. D'autres éléments perturbateurs sont difficiles à prendre en compte dans des bases de données mais peuvent faire l'objet d'observations précises, comme des dérangements ponctuels par un passage de randonneurs ou la présence de personnes. Certaines sources d'intérêt ponctuelles sont mobiles et sont impossibles à cartographier, comme des sources éphémères de nourriture. Les interactions entre les individus jouent aussi un rôle, au sein d'une même espèce ou entre les espèces. Ces interactions seraient à mettre en lien avec l'environnement spatial. Cela représente un travail important de suivis et d'observation sur plusieurs espèces et sites d'étude.

- Applications en aménagement du territoire

Nous avions positionné notre objectif de simulation de trajectoires en aménagement du territoire. Les politiques de protection de la faune s'appuient sur les théories des effets des configurations paysagères, comme les effets positifs des corridors (Allag-Dhuisme *et al.*, 2010). La modélisation des éléments du paysage et celle des déplacements permettent de tester des scénarios d'aménagements à partir d'hypothèses sur les comportements des animaux. Certaines modifications du paysage peuvent être a priori négatives pour la connectivité des habitats, comme la construction de grandes infrastructures linéaires ou l'artificialisation des sols. Certains aménagements peuvent favoriser les déplacements et/ou la présence des espèces animales, comme une continuité de végétation ou des éléments du paysage utilisés pour des gîtes ou comme couloirs de déplacements (bosquets, arbres isolés, haies). Des mesures compensatoires comme les passages à faune peuvent être intégrées à un aménagement plus global du territoire. L'enjeu en aménagement est de donner la possibilité à la faune sauvage de s'adapter aux modifications dans leur domaine de vie de sorte que les populations animales puissent continuer à cohabiter sur un même espace avec les activités humaines. L'enjeu est aussi d'éviter les dégâts ou les accidents provoqués par les animaux. Les aménagements en faveur de la faune doivent être pensés pour permettre aux animaux de s'adapter aux modifications du paysage, sans déséquilibrer les écosystèmes ni porter un préjudice excessif aux activités humaines.

La thèse dont les principales réalisations sont décrites dans ce mémoire nous a tout d'abord permis d'approfondir nos connaissances des suivis actuels de la faune sauvage et de leur compréhension. Pour répondre à la problématique, nous avons adopté une démarche pluridisciplinaire. Grâce à la géomatique, nous avons pu mettre en œuvre des méthodes d'analyses des données géographiques et des données de localisations d'animaux. La représentation cartographique de ces données et la modélisation des résultats d'analyses nous ont permis de proposer un processus automatique de simulation de trajectoires. Les collaborations avec les géographes du paysage et les écologues ont été enrichissantes et elles nous ont apporté une ouverture sur les questionnements concernant les animaux et les avancées dans leur compréhension. Nous avons pu constater que les besoins en données de description de l'espace et sur les déplacements des animaux sont importants, en précisions spatiale et temporelle, afin de mieux comprendre les comportements de la faune et de les prendre en compte dans les changements apportés dans les territoires.

BIBLIOGRAPHIE

Abadie N., Mustière S., 2010, Constitution et exploitation d'une taxonomie géographique à partir des spécifications des bases de données. Revue internationale de géomatique, Volume 20 (2), p. 145-174

Adkins C. A., Stott P., 1998, Home ranges, movements and habitat associations of red foxes *Vulpes vulpes* in suburban Toronto, Ontario, Canada. Journal of Zoology, Volume 244 (3), p. 335-346

Adriaensen F., Chardon J. P., De Blust G., Swinnen E., Villalba S., Gulinck H., Matthysen E., 2003, The application of 'least-cost' modelling as a functional landscape model. Landscape and Urban Planning, Volume 64, p. 233-247

Ager A. A., Johnson B. K., Kern J. W., Kie J. G., 2003, Daily and seasonal movements and habitats use by female rocky mountain elk and mule deer. Journal of Mammalogy, Volume 84 (3), p. 1076-1088

Aggarwal P. K., Kalra N., Chander S., Pathak H., 2006, InfoCrop: A dynamic simulation model for the assessment of crop yields, losses due to pests, and environmental impact of agro-ecosystems in tropical environments. I. Model description. Agriultural Systems, Volume 89, p. 1-25

Alcamo J., Bennett E. M., 2003, Ecosystems and human well-being: a framework for assessment. Millennium Ecosystem Assessment, Island Press, 245 p.

Alexandre-Bidon D., Cano C., Rivière R., 2005, L'animal au Moyen-âge, Tour Jean sans peur, Paris, 16 p.

Allag-Dhuisme F., Barthod C., Bielsa S., Brouard-Masson J., Graffin V., Vanpeene S. (coordinateur), Chamouton S., Dessarps P-M., Lansiart M., Orsini A., 2010, Prise en compte des orientations nationales pour la préservation et la remise en bon état des continuités écologiques par les grandes infrastructures linéaires de l'État et de ses établissements publics. Éditeur MEEDDM, 89 p.

Allain Y.-M., 2012, Une histoire des jardins botaniques. Entre science et art paysager. Éditions QUAE, 112 p.

Allen T.F.H, Starr T.B., 1982, Hierarchy. Perspectives for ecological complexity. The University of Chicago Press, 326 p.

Amand B., Duponteil A., Strosser P., Boos M., 2012, Élaboration du plan national d'actions en faveur du hamster commun en Alsace pour la période 2012-2016. Sixième projet de Plan

National d'Actions en faveur des espèces, MEDDE. Document pour la consultation nationale, septembre 2012, ACTeon et NATURACONST@, 135 p.

Amsallem J., Deshayes M., Bonnevialle M., 2010, Analyse comparative de méthodes d'élaboration de trames vertes et bleues nationales et régionales. Irstea, Sciences, Eaux et Territoires, Volume 3, p. 40-45

ANA - Agir pour la Nature en Ariège-Pyrénées, 2002, Étude des migrations en masse de batraciens sur le département de l'Ariège. Rapport final, novembre 2002, 26 p.

Anciaux M. R., Libois R. M., 1990, Le chevreuil (*Capreolus capreolus* L.). Cahiers d'Éthologie appliquée, Volume 10 (2), p. 183-196

Andrienko N., Andrienko G., 2006, Exploratory analysis of spatial and temporal data. A systematic approach. Édition Springer, 703 p.

Andrusiak L., 2010, L'effraie des clochers (*Tyto alba*), population de l'est, population de l'ouest au Canada. Évaluation et rapport de situation du COSEPAC, 52 p.

Anizoba M. A., Obudulu C., 2006, Effect of ecosystem changes on air-borne and vegetation-dwelling arthropods in Agu-Awka area of Awka. Animal Research International, Volume 3 (2), p. 451-456

Anwar S. M., Jeanneret C. A., Parrott L., Marceau D. J., 2007, Conceptualization and implementation of a multi-agent model to simulate whale-watching tours in the St-Lawrence Estuary in Quebec, Canada. Environmental Modelling & Software, Volume 22, p. 1775-1787

Apps, C. D., 2000, Space-use, diet, demographics, and topographic associations of lynx in the southern Canadian Rocky Mountains: a study. Publié dans Ruggiero *et al.*, Ecology and Conservation of Lynx in the United States. University Press of Colorado, Boulder, Colorado, p. 351-371

APRR, 2007, L'A77, un premier bilan, un avenir encore à construire. Les apports de l'observatoire économique de l'A77. Les rencontres de l'économie, 30 janvier 2007, Chambre de commerce et d'industrie de la Nièvre, 65 p.

APRR, 2009, L'utilisation des passages à faune de l'autoroute A39. Résultats, analyses et perspectives août 2004 - avril 2009. APRR et Fédération départementale des chasseurs du Jura, 46 p.

Arbouet A., 2006, Suivi d'une population de chevreuil par radiopistage en milieu forestier. Rapport de stage, ONCFS, 48 p.

Arnal G., Bailly J.-C., Bertrand F. *et al.*, 2006, Atlas de la nature à Paris. Atelier Parisien d'urbanisme, Éditions Le Passage, 290 p.

Arnould P., 2006, Biodiversité : la confusion des chiffres et des territoires. Annales de Géographie, numéro 651, Édition Armand Colin, p. 528-549

Arnould P., Simon L., 2007, Géographie de l'environnement. Éditions Belin, Paris, 303 p.

ASS, 2011, Programme de conservation et de gestion durable de la biodiversité sahélo-saharienne de la zone de Termit/Tin Toumma, Niger. Rapport annuel d'activité 2011 du projet Antilopes Sahélo-Sahariennes, 59 p.

Aubertin C., Boisvert V., Vivien F.-D., 1998, La construction sociale de la question de la biodiversité. Natures Sciences Sociétés, Volume 6 (1), p. 7-19

AUCAME, 2008, Mobilités et déplacements. Agence d'études d'urbanisme de Caen-Métropole, mai 2008, 31 p.

Badard T., Braun A., 2004, OXYGENE : une plate-forme ouverte pour le déploiement de services web géographiques. Revue "Le Monde des Cartes" du Comité Français de Cartographie, numéro 181, p. 32-41

Balfour D., Dublin H. T., Fennessy J., Gibson D., Niskanen L., Whyte I. J., 2007, Examen des options pour le contrôle des impacts de la surabondance locale des éléphants africains. 1ère édition. IUCN, Gland, Suisse, 80 p.

Balkenhol N., Waits L. P., 2009, Molecular road ecology: exploring the potential of genetics for investigating transportation impacts on wildlife. Molecular Ecology, Volume 18, p. 4151-4164

Baltzinger C., 2003, Sélection des sites de repos par le Cerf (*Cervus elaphus* L.) et le Chevreuil (*Capreolus capreolus* L.) vivant en sympatrie en forêt tempérée de moyenne montagne. Mémoire de thèse, École Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, 171 p.

Baranyi G., Saura S., Podani J., Jordan F., 2011, Contribution of habitat patches to network connectivity: redundancy and uniqueness of topological indices. Ecological indicators, Volume 11, p. 1301-1310

Baras E., 1995, Seasonal activities of *Barbus barbus*: effect of temperature on time-budgeting. Journal of Fish Biology, Volume 46, p. 806-818

Baratay É., Hardouin-Fugier É., 1998, Zoos : histoire des jardins zoologiques en Occident, XVIème-XXème siècle. Éditions La Découverte, Paris, 294 p.

Baratay É., 2011, Une histoire des relations entre l'homme et l'animal. D'une histoire *humaine* à une histoire *animale*. Acte du colloque *L'évolution des relations entre l'homme et l'animal, une approche transdisciplinaire*. 29 novembre 2011, Paris, p. 4-6

Bartumeus F., Da Luz M. G. E., Viswanathan G. M., 2005, Animal search strategies: a quantitative random-walk analysis. Ecology, Volume 86 (11), p. 3078-3087

Bastian O., 2001, Landscape Ecology–towards a unified discipline? Landscape Ecology, Volume 16, p. 757-766

Baticle C., 2012, La copropriété cynégétique. Une démarche territoriale entre symbolique locale et spatialité animale. Carnets de géographies, numéro 5 : Géographie Humanimale, en ligne, [http://www.carnetsdegeographes.org]

Bautista L. M., García J. T., Calmaestra R. G., Palacín C., Martín C. A., Morales M. B., Bonal R., Viñuela J., 2004, Effect of weekend road traffic on the use of space by raptors. Conservation biology, Volume 18 (3), June 2004, p. 726-732.

Beaude B., Guillemot L., 2012, *Commuting Scales*. Cartographie dynamique d'accessibilité temporelle. Mappemonde 2012, Numéro 105, en ligne, [http://mappemonde.mgm.fr/]

Becu N., 2006, Identification et modélisation des représentations des acteurs locaux pour la gestion des bassins versants. Mémoire de thèse, Université de Montpellier II, 344 p.

Béguin M., Pumain D., 1994, La représentation des données géographiques. Statistiques et cartographie. Édition Armand Colin, 2nde édition 2005, 192 p.

Bélisle M., Desrochers A., Fortin M. J., 2001, Influence of forest cover on the movements of forest cover on the movements of forest birds: a homing experiment. Ecology, volume 82 (7), p. 1893-1904

Benhaiem S., Delon M., Lourtet B., Cargnelutti B., Aulagnier S., Hewison A. J. M., Morellet N., Verheyden H., 2008, Hunting increases vigilance levels in roe deer and modifies feeding site selection. Elsevier, Animal Behaviour, Volume 76, p. 611-618

Benhamou F., 2007, Crier au loup pour avoir la peau de l'ours. Une géopolitique locale de l'environnement à travers la gestion et la conservation des grands prédateurs en France. Mémoire de thèse de doctorat, École nationale du génie rural, des eaux et forêt de Paris, 665 p.

Bennett A. T., 1996, Do animals have cognitive maps? The journal of Experimental Biology, Volume 199, p. 219-224

Bennett A. T., 2003, Linkages in the Landscape. The role of corridors and connectivity in wildlife conservation. IUCN, Gland, Suisse et Cambridge, IK, 254 p.

Bennett G., Mulongoy K. J., 2006, Review of experience with ecological networks, corridors and buffer zones. Secretariat of the Convention on Biological Diversity, Montreal, Technical Series numéro 23, 100 p.

Bergerot B., 2010, Fonctionnement des communautés de rhopalocères en milieux urbain et périurbain. Mémoire de thèse, Université Pierre et Marie Curie, 217 p.

Beringer J. J., Seibert S. G., Pelton M. R., 1990, Incidence of road crossing by black bears on Pisgah National Forest, North Carolina. Bears: Their Biology and Management, Volume 8, p. 85-92

Bérion P., Joignaux G., Langumier J.-F., 2007, L'évaluation socio-économique des infrastructures de transport : enrichir les approches du développement territorial. Revue d'Économie Régionale et Urbaine, Volume 4, p. 651-676

Bernon C., Gleizes M.-P., Picard G., 2009, Méthodes orientées agent et multi-agent. Dans El Fallah-Seghrouchni A ; et Briot J.-P., Technologies des systèmes multi-agents et applications industrielles. Éditions Hermès-Lavoisier, p. 45-76

Berthoud G., Lebeau R. P., Righetti A., 2004, Réseau écologique national REN. Rapport final. Cahier de l'environnement numéro 373. Office fédéral de l'environnement des forêts et du paysage, Berne. 132 p.

Bertrand G., 1968, Paysage et géographie physique globale. Esquisse méthodologique. Revue Géographique des Pyrénées et du Sud-ouest, numéro 39 (3), p. 249-272

Binot A., Castel V., Caron A., 2006, L'interface faune-bétail en Afrique subsaharienne. Sécheresse, Volume 17 (1-2), p. 349-361

Bjorneraas K., Van Moorter B., Rolandsen C. M., Herfindal I., 2010, Screening global positioning system location data for errors using animal movement characteristics. Journal of Wildlife Management, Volume 74 (6), p. 1361-1366

Blair R. B., 1996, Land use and avian species diversity along an urban gradient. Ecological Applications, Volume 6 (2), p. 506-519

Blanc N., 2000, Les animaux et la ville. Éditions Odile Jacob, 230 p.

Blanc N., Cohen M., 2002, L'animal : une figure de la géographie contemporaine. Espaces et Sociétés. La place de l'animal, L'Harmattan, Paris, p. 25-40

Blanc-Pamard C., Milleville P., Grouzis M., Lasry F., Razanaka S., 2005, Une alliance de disciplines sur une question environnementale : la déforestation en forêt des Mikea (Sud-Ouest de Madagascar). Natures Sciences Sociétés, Volume 13, p. 7-20

Blanco J. C., Cortés Y., Virgos E., 2005, Wold response to two kinds of barriers in an agricultural habitat in Spain. Canadian Journal of Zoology, Volume 83, p. 312-323

Bobbé S., 2000, Les nouvelles cultures du sauvage ou la quête de l'objet manquant. État de la question. Ruralia, Volume 7, en ligne : [http://ruralia.revues.org/180], 13 p.

Bodin C., 2005, Partage de l'espace et relation de voisinage dans une population continentale de Blaireaux européens (*Meles meles*). Mémoire de thèse en Biologie et l'Évolution et Écologie, Université de Montpellier II, 138 p.

Boissonade J., Hackenberg K., 2011, La nature contre la culture ? Développement durable et territoires. Volume 2, numéro 2, en ligne, 13 p.

Bolay J.-C., Pedrazzini Y., Rabinovich A., 2000, Quel sens au « développement durable » dans l'urbanisation du tiers monde ? Les Annales de la Recherche Urbaine, numéro 86, p. 77-84

Bonenfant C., Klein F., 2004, Évolution de la population de cerfs (*Cervus elaphus L.*) du Parc National des Cévennes. Rapport de l'Office National de la chasse et de la Faune Sauvage pour le Parc National des Cévennes, août 2004, 79 p.

Bonerandi E., 2004, De la mobilité en géographie. Géocofluences, ENS de Lyon, en ligne, [http://geoconfluences.ens-lyon.fr/]

Bonnin M., 2008, Les corridors écologiques. Vers un troisième temps du droit de la conservation de la nature ? L'Harmattan, Paris, 276 p.

Bonnot N., Debeffe L., Fontaine L., Gohier M., 2012 [1], The study of roe deer personalities in the field. Réseau comportement, INRA, 6-7 juin 2012

Bonnot N., Morellet N., Verheyden H., Cargnelutti B., Lourtet B., Klein F., Hewison A. J. H., 2012 [2], Habitat use under predation risk: hunting, roads and human dwellings influence the spatial behaviour of roe deer. European Journal of Wildlife Research, avril 2013, Volume 59 (2), p. 185-193

Börger L., Franconi N., De Michele G., Gantz A., Meschi F., Manica A., Lovari S., Coulson T., 2006, Effects of sampling regime on the mean and variance of home range size estimates. Journal of Animal Ecology, Volume 75, p. 1393-1405

Bortolamiol S., Cohen M., Palibrk M., Krief S., 2012, La répartition des chimpanzés à Sebitoli (Parc National de Kibale, Ouganda) : influence des facteurs naturels et anthropiques. Revue de primatologie, Volume 4, en ligne, [http://primatologie.revues.org/1103]

Bosquet M., 2007, Stabilité inter-annuelle du domaine vital chez le chevreuil (*Capreolus capreolus*). Mémoire de master recherche, Université Paul Sabatier, 43 p.

Boucher A., Cauchetier B., 2012, ECOLINE, la cartographie des éléments de biodiversité des paysages ruraux. IAURIF, Note rapide, numéro 596, juillet 2012, 6 p.

Boulanger V., 2010, Pression d'herbivores et dynamiques des communautés végétales : influences à court et moyen termes des populations de cervidés sur la diversité des communautés végétales en forêt. Mémoire de thèse en Biologie Végétale et Forestière, Université Nancy – Henri Poincaré, 289 p.

Bouquier G., 2003, Contribution à l'étude de la gestion de la population de cerfs (*Cervus elaphus*) de la Pinatelle d'Allanche (Cantal, France). Mémoire de thèse, École Nationale Vétérinaire de Toulouse, 116 p.

Bourgeois L., Kneeshaw D., Boisseau G., 2005, Les routes forestières au Québec : Les impacts environnementaux, sociaux et économiques. VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement, Volume 6, numéro 2, septembre 2005, 12 p.

Bourgoin G., Garel M., Dubray D., Maillard D., Marty É., Gaillard J.-M., 2007, Échecs de localisation des colliers GPS : une source d'erreurs à maîtriser. ONCFS Rapport scientifique 2007, p. 66-73

Bourgoin G., 2008, Étude des variations spatio-temporelles de l'activité et de l'utilisation des ressources par les herbivores. L'exemple du mouflon méditerranéen (*Ovis gmelilni musimon x Ovis sp.*) et du chevreuil (*Capreolus capreolus*). Mémoire de thèse, Université Claude-Bernard – Lyon 1, 217 p.

Bousquet F., Le Page C., Müller J.-P., 2002, Modélisation et simulation multi-agent. 2èmes assises du GDR I3, 4-6 décembre 2002, Nancy, p. 173-182

Boussin L., 2006, Société et animal : contrôler la grande faune sauvage. L'exemple du chevreuil dans le département de la Haute Vienne. Mémoire de thèse en géographie, Université de Limoges, 435 p.

Boves, T. J., Belthoff, J. R., 2012, Roadway mortality of barn owls in Idaho, USA. The Journal of Wildlife Management, Volume 76, p. 1381-1392

Boyer C., 2004, Identification des zones à risque de contamination humaine par *Echinococcus multilocularis*, par l'étude des hôtes porteurs : renards roux (*Vulpes vulpes*) et campagnols des champs et terrestre (*Microtus arvalis* et *Arvicola terrestris*). Application sur l'agglomération d'Annemasse (Haute-Savoie). Mémoire de fin d'étude, ENSA Rennes, ERZ, 66 p.

Bradshaw I. G. A., 2004, Not by bread alone: symbolic loss, trauma, and recovery in elephant communities. Society & Animals, Volume 12 (2), p. 143-158

Brasebin M., 2009, GeOxygene: an open 3D framework for the development of geographic applications. Actes de la 12ème conférence AGILE *International Conference on Geographic Information Science*, 2-5 juin 2009, Hanovre, Allemagne, p. 1-13

Brasebin M., 2010, GeOxygene : une plate-forme de développement 3D. M@ppemonde, numéro 96, février 2010, en ligne, [http://mappemonde.mgm.fr/num24/fig09/fig09405.html]

Braunisch V., Patthey P., Arlettaz R., 2011, Spatially explicit modeling of conflict zones between wildlife and snow sports: prioritizing areas for winter refuges. Ecological Applications, Volume 21 (3), p. 955-967

Bray Y., Devillard S., Marboutin E., Mauvy B., Péroux R., 2007, Natal dispersal of European hare in France. Journal of Zoology, Volume 273 (4), p. 426-434

Bray Y., Marboutin É., Mauvy B., Préoux R., 2004, La dispersion natale chez le lièvre d'Europe : mise en évidence et quantification du phénomène. Rapport scientifique 2004 de l'ONCFS, p. 42-49

Brendel C., Helder R., Chevallier D., Zaytoon J., Georges J.-Y., Handrich Y., 2012, Testing a Global Positioning System on free-ranging badgers *Meles meles*. Mammal Notes, the Mammal Society, printemps 2012, p. 1-5

Bretagnolle A., 2009, Villes et réseaux de transport : des interactions dans la longue durée (France, Europe, États-Unis). Mémoire d'Habilitation à diriger des recherches, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 204 p.

Briot J.-P., Demazeau Y., 2001, Principes et architecture des systèmes multi-agents. Éditions Hermès Lavoisier, Paris, 272 p.

Brunet R., Ferras R., Théry H., 2005, Les mots de la géographie : dictionnaire critique. La documentation française, 3ème édition, 518 p.

Bryson J. J., Ando Y., Lehmann H., 2007, Agent-based modelling as scientific method: a case study analysing primate social behaviour. Philosophical Transactions of the Royal Society B, Volume 362, p. 1685-1698

Buard E., 2011, Pratiques spatiales des populations animales : analyses par les trajectoires. Actes des dixièmes rencontres de Théo Quant, Besançon, 23-25 février 2011, p. 10-14

Buard E., 2013, Dynamiques des interactions espèces – espace ; mise en relation des pratiques de déplacement des populations d'herbivores et de l'évolution de l'occupation du sol dans le parc de Hwange (Zimbabwe). Mémoire de thèse, Université Paris I, 395 p.

Bujoczek, M., Ciach, M., Yosef, R., 2011, Road-kills affect avian population quality. Biological Conservation, Volume 144, p. 1036-1039

Bunn A. G., Urban D. L., Keitt T. H., 2000, Landscape connectivity: a conservation application of graph theory. Journal of Environmental Management, Volume 59, p. 265-278

Burel F., Baudry J., 1995, Social, aesthetic and ecological aspects of hedgerows in rural landscapes as a framework for greenways. Landscape and Urban Planning, Volume 33, p. 327-340

Burel F., Baudry J., 1999, Écologie du paysage. Concepts, méthodes et applications. Éditions TEC & DOC, Paris, 359 p.

Burger J. R., Chesh A. S., Castro R. A., Ortiz Tolhuysen L., Torre I., Ebendsperger L. A., Hayes L. D., 2009, The influence of trap type on evaluating population structure of the semifossorial and social rodent *Octodon degus*. Acta Theriologica, Volume 54 (4), p. 311-320

Cacard B., 2004, La mortalité du chevreuil (*Capreolus capreolus*) en France. Mémoire de thèse de doctorat, École Vétérinaire de Maison Alfort, 172 p.

Cain III J. W., Krausman P. R., Jansen B. D., Margart J. R., 2005, Influence of topography and GPS fix interval on GPS collar performance. Wildlife society Bulletin, Volume 33 (3), p. 926-934

Calenge C., Maillard D., Invernia N., Gaudin J.-C., 2005, Reintroduction of roe deer *Capreolus capreolus* into a Mediterranean habitat: female mortality and dispersion. Wildlife Biology, Volume 11 (2), p. 153-161

Calenge C., Dray S., Royer-Carenzi M., 2009, The concept of animal's trajectories form a data analysis perspective. Ecological informatics, Volume 4, p. 34-41

Camproux-Duffrène M.-P., Lucas M., 2012, L'ombre portée sur l'avenir de la trame verte et bleue. Quelques réflexions juridiques. Développement durable et territoires, Volume 3 (2), juillet 2012, en ligne, [http://developpementdurable.revues.org/9256]

Cantat O., 2004, L'îlot de chaleur urbain parisien selon les types de temps. Norois, Volume 191 (2), p. 75-102

Cargnelutti B., 2007, Influence de l'hétérogénéité du paysage sur l'occupation de l'espace de chevreuils (*Capreolus capreolus*) vivant en milieu fragmenté. Mémoire de l'École Pratique des Hautes Études, 17 p.

Cargnelutti B., Coulon A., Hewison M., Goulard M., Angibault J.-M., Morellet N., 2007 Testing Global Positioning System Performance for Wildlife Monitoring Using Mobile Collars and Known Reference Points. Journal of Wildlife Management, Volume 71, p. 1380-1387

Carrière S. M., Hervé D., Andriamahefazahy F., Méral P., 2008, Les corridors, passage obligé ? L'exemple malgache. Édité dans Aubertin C., Etienne R., Aires protégées : espaces durables ? IRD, 2008, p. 89-112

Carrillo E., Saenz J. C., Fuller T. K., 2002, Movements and activities of White-lipped peccaries in Corcovado National Park, Costa Rica. Biological Conservation, Volume 108, p. 317-324

Catsaras M. V., 1999, Histoire des rapports humains-animaux dans les sociétés occidentales. Bulletin de la Société Française d'Histoire de la Médecine et des Sciences Vétérinaires, Volume 1 (1), en ligne, [http://sfhmsv.free.fr/]

Cattet M., Boulanger J., Stenhouse G., Powell R. A., Reynolds-Hogland M. J., 2008, An evaluation of long-term capture effects in ursids: implications for wildlife welfare and research. Journal of Mammalogy, Volume 89 (4), p. 973-990

Cavallini P., Lovari S., 1991, Environmental factors influencing the use of habitat in the red fox, *Vulpes vulpes*. Journal of Zoology, Volume 223 (2), p. 323-339

Cederlund G., 1983, Home range dynamics and habitat selection by roe deer in a boreal area in central Sweden. Acta Theriologica, Volume 28 (30), p. 443-460

CERTU, 2005, Accessibilité des espaces publics urbains. Outil d'évaluation ergonomique. Rapport du Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques, novembre 2005, 44 p.

CERTU, 2006, Les définitions de l'urbain. Fiche d'information, numéro 8, août 2006, 3 p.

Chanvallon S., 2009, Anthropologie des relations de l'Homme à la Nature. La Nature vécue entre peur destructrice et communion intime. Mémoire de thèse de doctorat, Université Rennes 2, 532 p.

Chardonnel S., du Mouza C., Fauvet M.-C., Josselin D., Rigaux P., 2004, Patrons de mobilité : proposition de définition, de méthode de représentation et d'interrogation. Journées Cassini, 7ème conférence du GDR SIGMA Géomatique et Analyse Spatiale, 2-4 juin 2004, p. 19-25.

Charlez A., 2007, Les réserves de chasse et de faune sauvage : des origines aux statuts actuels. Faune sauvage, numéro 278, novembre 2008, p. 93-98

Charlez A., 2008, Plan de chasse et dégâts à la forêt : l'évolution. Faune sauvage, numéro 281, juillet 2008, p. 56-63

Chautan M., Pontier D., Artois M., 2000, Role of rabies in recent demographic changes in Red Fox (*Vulpes vulpes*) populations in Europe. Mammalia, Volume 64 (4), p. 391-410

Chen I.-C., Hill J. K., Ohlemüller R., Roy D. B., Thomas C. D., 2011, Rapid range shifts of species associated with high levels of climate warming. Science, Volume 333, p. 1024-1026

Chetkiewicz C.-L. B., St. Clair C. C., Boyce M. S., 2006, Corridors for conservation integrating pattern and process. Annual Review of ecology, Evolution, and Systematics, p. 317-344

Chevrier T., Bergeon J.-P., Léonard Y., 2009, Comment capturer des cervidés en montagne ? Faune sauvage, numéro 285, septembre 2009, p. 16-21

Chevassus-au-Louis B., 2006, Un nouveau regard sur la biodiversité du vivant. Annales des Mines, Responsabilité et Environnement, numéro 44, octobre 2006, p. 7-15

Clavel J., 2007, Spécialistes et généralistes face aux changements globaux : approches comportementales et évolutives. Thèse de doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie, 291 p.

Clergeau P., 2007, Une écologie du paysage urbain. Éditions Apogée, Rennes, 137 p.

CNRS, 2007, Les animaux polaires, sentinelles des changements climatiques. Centre national de la recherche scientifique, le journal du CNRS, Numéro 16, octobre 2007, p. 16-19

Cobben M. M. P., Linnell J. D. C., Solberg E. J., Andersen R., 2009, Who wants to live forever? Roe deer survival in a favourable environment. Ecological Research, Volume 24, p. 1197-1205

Codling E. A., Planck M. J., Benhamou S., 2008, Random walk models in biology. Journal of the Royal Society Interface, Volume 5, p. 813-834

Coffin A. W., 2007, From roadkill to road ecology: A review of the ecological effects of roads. Journal of Transport Geography, Volume 15, p. 396-406

Cohen M., Frédéric A., Nicole-Régine M., 1997, Modelling interactions between biophysical and social systems: the example of dynamics of vegetation in Causse Mejan (Fance). Cybergeo, European Journal of Geography, 10ème Colloque Européen de Géographie Théorique et Quantitative, Rostock, Allemagne, 6-11 septembre, en ligne, [http://cybergeo.revues.org/1551]

Cohen M., 2012, Biodiversité et mondialisation : une relation ambigüe. Dans Ghorra-Gobin C. (sous la direction de), *Dictionnaire des mondialisations*, Édition Armand-Colin, Paris, 2ème édition, p. 82-87

Cohen M., Baudoin R., Palibrk M., Persyn N., Rhein C., 2012, Urban biodiversity and social inequalities in built-up cities: new evidences, next questions. The example of Paris, France. Landscape and Urban Planning, Volume 106 (3), p. 277-287

COMOP TVB, 2009, Choix stratégiques de nature à contribuer à la préservation et à la restauration des continuités écologiques. Orientations nationales pour la préservation et la restauration des continuités écologiques. Guide 1 – Enjeux et principes de la TVB, 47 p.

COMOP TVB, 2010, Guide méthodologique identifiant les enjeux nationaux et transfrontaliers relatifs à la préservation et à la restauration des continuités écologiques et comportant un volet relatif à l'élaboration des schémas régionaux de cohérence écologique. Trame Verte et Bleue. Orientations nationales pour la préservation et la restauration des continuités écologiques. Guide 2 – appui méthodologique à l'élaboration régionale de la TVB, 82 p.

Conruyt-Rogeon G., Girardet X., 2012, Identification des points de conflits entre la faune et les routes. Méthode d'observation des collisions par les agents des routes. Retour d'expérience sur le réseau de la DIR Est en Franche-Comté. Rapport du Service du Patrimoine Naturel, 75 p.

Contesse P., Hegglin D., Gloor S., Bontadina F., Deplazes P., 2004, The diet of urban foxes (*Vulpes vulpes*) and the avaibility of anthropogenic food in the city of Zurich, Switzerland. Mammalian Biology, Volume 69 (2), p. 81-95

Corbane C., Lavventure S., Alleaume S., Deshayes M., 2013, Mapping of natural and semi-natural vegetation types in French agricultural lanscapes. Actes de la conference IALE 2013, Manchester, UK, 2 p.

Corlatti L., Hackländer K., Frey-Roos F., 2009, Ability of Wildlife Overpasses to Provide Connectivity and Prevent Genetic Isolation. Society for Conservation Biology, Volume 23 (3), p. 548-556

Cosson J.-F., Estoup A., Coulon A., Galan M., Mortier F., Hewison A. J. M., Guillot G., 2006, Un modèle géostatistique pour la détection et la localisation des discontinuités génétiques spatiales entre populations. Les Actes du Bureau des Ressources Génétiques, Volume 6, p. 41-55

Couderc J.-M., 1980, Autoroutes et espaces forestiers. Norois, numéro 105, janvier-mars 1980, p. 33-44

Coulon A., Morellet N., Goulard M., Cargnelutti B., Angibault J.-M., Hewison A. J. M., 2008, Inferring the effects of landscape structure on roe deer (*Capreolus capreolus*) movements using a step selection function. Landscape Ecology, Volume 23, p. 603-614

Coulon A., Palmer S., Clobert J., Travis J., 2010, Au-delà des chemins de moindre coût : un simulateur simple de mouvement stochastique pour modéliser la connectivité du paysage. Actes du colloque Écologie 2010, 2-4 septembre 2010, p. 238

Courtois R., Ouellet J.-P., Breton L., Gingras A., Dussault C., 2002, Effet de la fragmentation du milieu sur l'utilisation de l'espace et la dynamique de population chez le caribou forestier. Rapport, Société de la faune et des parcs du Québec, Université du Québec à Rimouski, 51 p.

Davies Z. G., Pullin A. S., 2007, Are hedgerows effective corridors between fragments of woodland habitat? An evidence-based approach. Landscape Ecology, Volume 22, p. 333-351

Davoine P.-A., Beck É., André-Poyaud I., Chardonnel S., Lutoff C., Telechev A., 2012, Géovisualisation pour la réduction de la vulnérabilité socio-spatiale en milieu urbain. Le cas de Grenoble. Comité Français de Cartographie, numéro 211, p. 69-83

De Sadeleer N., Fauconnier J. M., Kustjens G., Berthoud G., Cooper R. J., 2003, Études relatives au transport et à la diversité biologique et paysagère. Édition du Conseil de l'Europe, Sauvegarde de la nature, numéro 132, 137 p.

De Wan A. A., Sullivan P. J., Lembo A. J., Smith C. R., Maerz J. C., Lassoie J. P., Richmond M. E., 2009, Using occupancy models of forest breeding birds to prioritize conservation planning. Biological Conservation, Volume 142, p. 982-991

Debaere O., Bourhy H., Dacheux L., Brard C., Gellé R., Guagere É., Larcher G., Combes B., Picard E., Cliquet F., 2010, La rage en France : une menace permanente contre laquelle un niveau élevé de surveillance doit être maintenu. Présentation du dispositif de surveillance, bilan sanitaire chiffré au cours de la décennie 2000-2009, Rappel des mesures de prévention. Direction générale de l'alimentation, 9 p.

Debeffe L., Morellet N., Cargnelutti B., Lourtet B., Bon R., Gaillard J. M., Mark Hewison A. J., 2012, Condition-dependent natal dispersal in a large herbivore: heavier animals show greater propensity to disperse and travel further. Journal of Animal Ecology, Volume 81 (6), p. 1327-1337

Decors A., Moinet M., Mastain O., 2011, SAGIR, Bilan 2009-2010. Réseau SAGIR, 40 p.

Degregorio B. A., Manning J. V., Bieser N., Kingsbury B. A., 2011, The spatial ecology of the Eastern Massasauga (*Sistrurus C. Catenatus*) in Northern Michigan. Herpetologica, Volume 67 (1), p. 71-82

Delattre P., Duplantier J.-M., Ficher-Calvet É., Giraudoux P., 1998, Pullulation de rongeurs, agriculture et santé publique. Avec le Réseau « Populations-Paysages » et Centre collaborateur pour la prévention et le traitement des échinococcoses humaines. Cahiers Agricultures, Volume 7, p. 285-298

Demazeau Y., 2003, Créativité émergente centrée utilisateur. Sous la direction de Briot J., Khaled G., Déploiement des systèmes multi-agents – Vers un passage à l'échelle (Journées francophones sur les systèmes multi-agents, JFSMA'03), Éditions Hermès -Lavoisier, p. 31-36

Denis M., Hamard J.-P., Bouilly C., Boscardin Y., 1998, Bioindicateurs de population et chevreuil (*Capreolus capreolus*) écotype de plaine en Berry (France). Actes du Congrès de l'Union internationale des biologistes du gibier, Lyon, 1-6 septembre 1997, p. 565-575

Deymier G., 2005, Capitalisation immobilière des gains d'accessibilité : étude de cas sur l'agglomération lyonnaise. Mémoire de thèse en sciences économiques, Université Lumière Lyon 2

Dickson B. G., Beier P., 2007, Quantifying the influence of topographic position on cougar (*Puma concolor*) movement in southern California, USA. Journal of Zoology, Volume 271, p. 270-277

Digard J.-P., 1988, Jalons pour une anthropologie de la domestication animale. L'Homme, Volume 28, numéro 108, p. 27-58

Digard J.-P., 2012, Changement social et évolution des usages et des représentations du cheval en France depuis 1960. Académie d'Agriculture de France, séance du 14 novembre 2012, Cheval et modernité, 2 p.

Di Méo G., 1998, Géographie sociale et territoire. Édition Nathan, Paris, 320 p.

Donald P. F., Pisano G., Rayment M. D., Pain D. J., 2002, The common agricultural policy, EU enlargement and the conservation of Europe's farmland birds. Agriculture, Ecosystems and Environment, Volume 89, p. 167-182

Doniec A., Mandiau R., Piechowiak S., Espié S., 2006, L'anticipation comme modèle d'interaction : application à la coordination multi-agent en simulation. Actes du congrès RFIA *Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle*, Tours, 25-27 janvier 2006, 8 p.

Dray S., Royer-Carenzi M., Calenge C., 2010, The exploratory analysis of autocorrelation in animal-movement studies. Ecological Research, Volume 25, p. 673-681

DREAL Rhônes-Alpes, 2008, SCOT et corridors biologiques. Exemples d'intégration dans quelques schémas de cohérence territoriale. Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement, 52 p.

DREAL Rhône-Alpes, 2010, La Base de Données Topographiques Rhône. Un outil innovant, un référentiel commun, destiné à la prévention des risques d'inondations, 11 p.

DREAL Rhônes-Alpes, 2011, Plan d'action national sur le loup 2008-2012 dans le contexte français d'une activité importante et traditionnelle d'élevage. DREAL et DRAAF Rhône-Alpes, Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement, 18 p.

Duchamp C., Genevey V., Favier F., Lacour N., 2004, Le retour du loup dans les Alpes françaises. Rapport final juillet 1999 – mars 2004. Direction de la nature et des paysages, Ministère de l'écologie et du développement durable. 95 p.

Ducrot D., 2005, Méthode d'analyse et d'interprétation d'images de télédétection multi-sources. Extraction de caractéristiques du paysage. Mémoire pour l'habilitation à diriger des recherches, INP Toulouse, 240 p.

Dugdale S. J., Lovett A. A., Watkinson A. R., Atkinson P.W., 2009, Historical analysis of habitat associations with intra-guild richness hotspots for farmland birds: clues for the successful deployment of agri-environment schemes. Actes de la conférence GISRUK 2009, Durham, UK, p. 131-134

Dupérat M., 2005, Le renard. Éditions Artémis, 64 p.

Encyclopaedia Universalis, 1999, Dictionnaire de l'Écologie. Édition Albin Michel, 1399 p.

Espuno N., 2004, Impact du loup (*Canis Lupus*) sur les ongulés sauvages et domestiques dans le massif du Mercantour. Mémoire de thèse, Université Montpellier II, 214 p.

Ethier K., Fahrig L., 2011, Positive effects of forest fragmentation, independent of forest amount, on bat abundance in eastern Ontario, Canada. Landscape Ecology, Volume 26, p. 865-876

Ferber J., 1995, Les systèmes multi-agents, vers une intelligence collective. InterEditions, Paris, 522 p.

FERUS, 2007, Le loup en France. Groupe Loup France / ARTUS. Fondation Nature et Découvertes, 16 p.

FIC, 2011, Document de formation agrément de piégeur. Fédération interdépartementale de Paris, des Hauts-de-Seine, de la Seine Saint-Denis et du Val de Marne, 130 p.

Fichant R., 2003, Le cerf, biologie, comportement, gestion. Éditions du Gerfaut, 248 p.

Finder R. A., Roseberry J. L., Woolf A., 1999, Site and landscape conditions at white-tailed deer/vehicle collision locations in Illinois. Landscape and Urban Planning, Volume 44, p. 77-85

FNC, 2010, Le guide du piégeur. Fédération Nationale des Chasseurs, Issy-les-Moulineaux, 40 p.

FNE, RFF, 2012, Biodiversité et grands projets ferroviaires. Intégrer les enjeux écologiques dès le stade des études. Édite par France Nature Environnement et Réseau Ferré de France, 60 p.

Foltête J.-C., Clauzel C., Vuidel G., 2012, A software tool dedicated to the modelling of landscape networks. Environmental Modelling & Software, Volume 38, p. 316-327

Forman R. T. T., Alexander L. E., 1998, Roads and their major ecological effects. Annual Review of Ecological System, 1998, Numéro 29, p. 207-231

Forman R. T. T., Godron M., 1986, Landscape Ecology. Eds. John Wiley & Sons, 619 p.

Fortin D., Beyer H. L., Boyce M. S., Smith D. W., Duchesne T., Mao J. S., 2005, Wolves influence elk movements: behavior shapes a trophic cascade in Yellowstone National Park. Ecology, Volume 86 (5), p. 1320-1330

Fretwell S. D., Lucas H. L., 1970, On territorial behavior and other factors influencing habitat distribution in birds. Acta Biotheoretica, Volume 19, p. 16-36

Fry G., Tveit M. S., Ode A., Velarde M. D., 2009, The ecology of visual landscapes: exploring the conceptual common ground of visual and ecological landscape indicators. Ecological Indicators, Volume 9, p. 933-947

Fryxell J. M., Hazell M., Börger L., Dalziel B. D., Haydon D. T., Morales J. M., McIntosh T., Rosatte R. C., 2008, Multiple movement modes by large herbivores at multiples spatiotemporal scales.

PNAS, Proceedings of the National Academy of Sciences, Volume 105 (49), décembre 2008, p. 19114-19119

Galois Patrick, Bonin Joël, 1999, Rapport sur la situation de la tortue des bois (*Clemmys insculpta*) au Québec. Faune et Parcs Québec, Direction de la faune et des habitats, 55 p.

Gangat Y., David D., Payet D., Courdier R., 2009, Modéliser et simuler l'aménagement énergétique d'un territoire par les systèmes multi-agents. Actes du Colloque sur la Convergence des Réseaux, de l'Informatique et du Multimédia pour les E-Services, 12-13 novembre 2009, Saint Denis de La Réunion, France, 6 p.

Gaudin J.-C., Maillard D., Sand É., 1995, Caractérisation de la colonisation du chevreuil en zone méditerranéenne française. Forêt méditerranéenne, Tome XVI, numéro 3, juillet 1995, p. 291-298

Germonpré M., Laznickova-Galetova M., Sablin M. V., 2012, Paleolithic dog skulls at the Gravettian Predmosti site, the Czech Republic. Journal of Archeological Science, Volume 39 (1), p. 184-202

Getz W. M., Fortmann-Roe S., Cross P. C. , Lyons A. J. , Ryan S. J. , *et al.*, 2007, LoCoH: Nonparameteric Kernel Methods for Constructing Home Ranges and Utilization Distributions. PLoS ONE 2 (2), en ligne, [http://www.plosone.org/]

Girard I., 2005, Choisir le GPS adéquat. Espaces Naturels, numéro 10, avril 2005, p. 30-31

Girard I., Adrados C., Bassano B., Janeau G., 2009, Application de la technologie GPS au suivi du déplacement de bouquetins des Alpes (*Capra ibex ibex*, L.) dans les parcs nationaux de la Vanoise et du Gran Paradiso (Italie). Travaux Scientifiques du Parc National de la Vanoise, Tome XXIV, p. 105-126

Godet L., 2010, La « nature ordinaire » dans le monde occidental. L'Espace Géographique, Tome 39 (4), octobre 2010, p. 295-308

Godron M., 2010, La préparation de la « trame verte » pour les paysages du littoral de la Méditerranée. Convention européenne du paysage, Florence, Italie, 19-20 octobre 2010, 8 p.

Gottardi E., 2011, Landscape openness effect roe deer, *Capreolus capreolus*, behavior. Mémoire de thèse, Université Paul Sabatier, Toulouse, 180 p.

Griffin D. R., Speck G. B., 2004, New evidence of animal consciousness. Animal Cognition, Volume 7, p. 5-18

Gouabault E., 2012, Aux frontières de l'animal. Mise en scène et réflexivité. Carnets de géographies, numéro 5, en ligne [http://www.carnetsdegeographes.org]

Gould J. L., 2002, Can honey bees create "cognitive maps"? Dans The Cognitive Animal: Empirical and Theoretical Perspectives on Animal Cognition. Édité par Bekoff M., Allen C., Burhgardt G. M., The MIT Press, p. 41-45

Guillerme S., Maire É., Moppert B., Hinnewinkel C., 2009, Cohabiter avec la grande faune dans le sud de l'Inde : opportunité ou menace ? Géographie et cultures, numéro 69, *Protéger la nature, est-ce protéger la société ?* p. 59-79

Guillet F., 2011, Une analyse stratégique pour l'organisation à finalité environnementale. Le cas d'une ONGE, la Tour du Valat Centre de recherche pour la conservation des zones humides méditerranéennes. Mémoire de thèse, Université de Cergy-Pontoise, AgroParisTech, 474 p.

Guinard É., Ferreira L., 2008, Cartographie des trames vertes et bleues en Aquitaine. Approche méthodologique. Atelier Géothématique Environnement, 25 septembre 2008, CETE Sud-Ouest, 38 p.

Guinaudeau M., 2006, Étude préalable pour la mise en œuvre du « Fond Vert » produit par l'IFN et l'GN. Mémoire d'examen professionnel, IGN, 53 p.

Guitton J.-S., 2001, Évaluation de la capacité d'accueil du milieu urbain nantais pour le renard roux (*Vulpes vulpes*) par l'étude des domaines vitaux. Mémoire de stage, Université de Nantes, 24 p.

Hägerstrand T., 1970, What about people in regional science? Papers of the Regional Science Association, Volume 24, p. 7-21

Hamann J.-L., Bonenfant C., Holveck H., 2003, Les apports du marquage pour la gestion du Cerf élaphe. Faune Sauvage, Volume 260, p. 30-36

Hamard J.-P., Ballon P., 2009, Guide pratique d'évaluation des dégâts en milieu forestier. Guide pratique, Cemagref, 32 p.

Harris S., Rayner J. M. V., 1986, Urban Fox (Vulpes vulpes) Population Estimates and Habitat Requirements in Several British Cities. Journal of Animal Ecology, Volume 55 (2), p. 575-591

Hars J., Boschiroli M.-L., Duvauchelle A., Garin-Bastuji B., 2006, La tuberculose à *Mycobacterium Bovis* chez le cerf et le sanglier en France ; émergence et risque pour l'élevage bovin. Bulletin de l'Académie Vétérinaire de France, tome 159, numéro 5, p. 393-401

Hehl-Lange S., 2001, Structural elements of the visual landscape and their ecological functions. Landscape and Urban Planning, Volume 54, p. 105-113

Helder R., Hubert P., 2012, État d'avancement du programme In Situ. CERFE, Université de Reims Champagne-Ardenne, 6 p.

Henry C., 2004, Organisation socio-spatiale d'une population de renards roux (*Vulpes vulpes*) en milieu rural : nature des relations et degrés de parenté entre individus de mêmes groupes spatiaux. Mémoire de thèse de doctorat, Université Strasbourg I, 169 p.

Hewison A. J. M., Morellet N., Verheyden H., Daufresne T., Angibault J.-M., Cargnelutti B., Merlet J., Picot D., Rames J.-L., Joachim J., Lourtet B., Serrano E., Bideau E., Cebe N., 2009, Landscape fragmentation influences winter body mass of roe deer. Ecology, Volume 32, p. 1062-1070

Hoff C., Rambal S., 2000, Les écosystèmes forestiers méditerranéens face aux changements climatiques. Impacts potentiels du changement climatique en France au XXIème siècle, Mission Interministérielle de l'Effet de Serre & Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, Imprimerie Nationale, Paris, p. 88-98

Holland R. A., Wikelski M., Kümmeth F., Bosque C., 2009, The secret life of oilbirds: new insights into the movement ecology of a unique avian frugivore. PLos ONE, Volume 4 (2), en ligne, [http://www.plosone.org/]

Hooten M. B., Johnson D. S., Hanks E., Lowry J. H., 2010, Agent-based inference for animal movement and selection. Journal of Agricultural, Biological, and Environment Statistics, Volume 15 (4), p. 523-538

Hsieh C.-M., Aramaki T., Hanaki K., 2011, Managing heat rejected from air conditioning systems to save energy and improve the microclimates of residential buildings. Computers, Environment and Urban Systems, Volume 35 (5), p. 358-367

Huijser M. P., Bergers P. J. M., 2000, The effect of roads and traffic on hedgehog (*Erinaceus europaeus*) populations. Biological Conservation, Volume 95, p. 111-116

Huisman O., Forer P., 1998, Computational agents and urban life spaces: a preliminary realization of the time-geography of student lifestyles. Dans les actes de la 3ème conférence internationale GeoComputation, Bristol, Grande-Bretagne, 17-19 septembre 2008, 18 p.

Husson F., Lê S., Pagès J., 2009, Analyse de données avec R. Presses universitaires de Rennes, 224 p.

IFN, 2006, Les indicateurs de gestion durable des forêts françaises. Inventaire Forestier National, Édition 2005, 148 p.

IFN, 2007, Massif vosgien et collines périphériques. Inventaire Forestier National, novembre 2007, 22 p.

IGN, 2000, Lambert-93 projection associée au système géodésique RGF93. Institut national de l'information géographique et forestière, Service de Géodésie et Nivellement, 3 p.

IGN, 2004, BD ORTHO® Version 2. Descriptif de contenu. Révision de 2010. Institut national de l'information géographique et forestière, 17 p.

IGN, 2008, BD TOPO® Version 2. Descriptif de contenu. Révision de 2009. Institut national de l'information géographique et forestière, 172 p.

IGN, 2012, La cartographie forestière – version 2 – de l'Inventaire forestier national. Institut national de l'information géographique et forestière, 54 p.

Imbert C., Dureau F., Giroud M., 2009, Méthodes d'analyse des mobilités urbaines des ménages : réflexions autour de l'enquête « Déplacements Poitiers ». Sous la direction de J. Macchi, Geografie del popolamento. Casi di Studio, metodi e teorie. Acte de la journée d'étude, Grosseto, 24-26 septembre 2008. Edition Unviersità di Siena, p. 89-96

Jacobson A. R., Provenzale A., von Hardenberg A., Bassano B., Festa-Bianchet M., 2004, Climate forcing and density dependance in a mountain ungulate population. Ecology, Volume 85 (6), p. 1598-1610

Jacquet K., Prodon R., 2009, Measuring the postfire resilience of a bird-vegetation system: a 28-year study in Mediterranean oak woodland. Oecologia, Volume 161, p. 801-811

Jepsen J. U., Topping C. J., 2004, Modelling roe deer (*Capreolus capreolus*) in a gradient of forest fragmentation: behavioural plasticity and choice of cover. Canadian Journal of Zoology, Volume 86 (3), p. 170-176

Jewett J. T., Lawrence R. L., Marshall L. A., Gessler P. E., Powell S. L., Savage S. L., 2011, Forest Science, Volume 57 (4), p. 320-335

JNE, 2004, Carte du parcours du loup italien. JNE, Journalistes Écrivains pour la Nature et l'Écologie, en ligne, [http://www.jne-asso.org/dossiers_loups.html#gps]

Johansson T., 2009, The spatial dimension of human-wildlife conflicts–discoveries of new animal geography. Dans Donert K., Ari Y., Attard M., O'Reilly G. et Schmeinck D., Geographical Diversity. Actes de la conférence HERODOT, Ayvalik, Turquie, 28-31 mai 2009, p. 257-265

Josselin D., 2010, Robustesse en analyse spatiale. Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, Université d'Avignon et des Pays du Vaucluse, 305 p.

Joveniaux A., 2005, Évolution des habitats naturels liés à la réalisation de l'A39. Quelques constats sur l'utilisation des ouvrages petite faune. Acte du colloque, version de juillet 2008. 4ème rencontres *Routes et petite faune sauvage*, 21-22 septembre 2005, Chambéry, p. 106-116

Jullien A., François D., 2006, Soil indicators used in road environmental impact assessments. Resources, Conservation and Recycling, Volume 48, p. 101-124

Kallmann M., 2005, Path planning in triangulations. Dans les actes de la conférence IJCAI International Joint Conference on Artificial Intelligence, Edimbourg, Écosse, 31 juillet 2005, p. 49-54.

Karsenty A., 2010, Biodiversité contre pétrole. Passages, numéro 164, septembre 2010, 4 p.

Kaschner K., 2004, Modelling and mapping of resource overlap between marine mammals and fisheries on a global scale. Mémoire de thèse, MMRU, Fisheries Centre, Department of Zoology, University of British Columbia, Canada, 240 p.

Kaswor W. F, Manley T. L., 1990, Road and trail influences on grizzly bears and black bears in Northwest Montana. International conference on bear research and management, Victoria, British Columbia, Canada, Février 1989, p. 79-84

Kaufmann V., 2004, La mobilité au quotidien : nécessité, proposition et test d'une nouvelle approche. Les territoires de la mobilité : L'aire du temps. Dans Vodoz L., Pfister Giauque B., Jemelin C., Presses polytechniques et universitaires romandes, p. 57-68

Kaufmann V., Schuler M., Crevoisier O., Rossel P., 2004, Mobilité et motilité, de l'intention à l'action. Cahier du LASUR, rapport de recherche, numéro 4, juin 2003, 80 p.

Kie J. G., Ager A. A., Bowyer R. T., 2005, Landscape-level movements of North American elk (*Cervus elaphus*) : effects of habitat patch structure and topography. Landscape Ecology, Volume 20 (3), p. 289-300

Klein F., Gendner J.-P., Storms D., Hamann J.-L., Saïd S., Michallet J., Pfaff E., 2006, Le GPS et l'étude des ongulés sauvages. Faune sauvage, numéro 272, juin 2006, p. 31-38

Klein F., 2008, Mieux chasser pour réaliser les plans de chasse. Symposium Cerf, Dijon, 18-19 avril 2008, p. 126-133

Klein F., Hamann J.-L., 1999, Domaines vitaux diurnes et déplacements de cerfs mâles (*Cervus elaphus*) sur le secteur de La Petite Pierre (Bas-Rhin). Gibier Faune sauvage, Volume 16 (3), p. 251-271

Klein F., Hamann F., Saïd S., Guérin F., 2011, Forêt et faune sauvage. Un exemple de gestion intégrée à la RNCFS de la Petite Pierre. Agriculture, Forêt et Faune sauvage. Académie d'Agriculture de France, séance du 30 mars 2011, 6 p.

Klein F., Rocquencourt A., Ballon P., 2008, Pour un meilleur équilibre sylvo-cynégétique. Des pratiques favorables aux cervidés. ONCFS, Cemagref, 54 p.

Köhler W., 1925, The mentality of apes. Édition Taylor & Francis, 345 p.

Kolb H. H., 1984, Factors affecting the movements of dog foxes in Edinburgh. Journal of Applied Ecology, Volume 21 (1), p. 161-173

Kraak M., 2003, The space-time cube revisited from a geovisualization perspective. Dans les actes de la 21ème conférence internationale de cartographie, ICC 2003, 10-16 août 2003, Durban, Afrique du Sud, p. 1988-1996

Krojerova-Prokesova J., Barancekova M., Sustr P., Heurich M., 2010, Feeding patterns of red deer *Cervus elaphus* an altitudinal gradient in the Bohemian Forest: effect of habitat and season. Wildlife Biology, Volume 16 (2), p. 173-184

Kwan M.-P., Lee J., 2003, Geovisualization of human activity patterns using 3D GIS: a time-geographic approach. Dans Michael F. Goodchild, D. G. Janelle, Éditions 2003, Spatially integrated social science: examples in best practice, chapitre 3. Oxford University Press, 23 p.

La Morgia V., Malenotti E., Badino G., Bona F., 2011, Where do we go from here? Dispersal simulations shed light on the role of landscape structure in determining animal redistribution after reintroduction. Landscape Ecology, Volume 26, p. 969-981

Lacoste A., Salanon R., 1999, Éléments de biogéographie et d'écologie. Édition Armand Colin, 2ème édition 2010. 318 p.

Laffon C., Laffon M., 2008, Dessiner le monde. Histoires de géographie. Édition du Seuil, Paris, 110 p.

Lagorse J., 2009, Modélisation, dimensionnement et optimisation des systèmes d'alimentation décentralisés à l'énergie renouvelable - Application des systèmes multi-agents pour la gestion de l'énergie. Mémoire de thèse, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 222 p.

Lammoglia A., Marilleau N., Josselin D., 2011, How to assess the robustness of a flexible transport using an Agent Based Model? First International workshop on Verification and Validation of multi-agent models for Complex Systems, Paris, 23 p.

Lang P., 2009, Rapport de l'étude sur la notion d'espèce nuisible. Ministère en charge de l'écologie, Paris, 156 p.

Lang S., Blonda P., 2013, Space-based solutions for biodiversity monitoring in service of the European Habitats Directive. Actes de la conférence IALE 2013, Manchester, UK, 2 p.

Langley R. B., 1999, Dilution of Precision. GPS World, mai 1999, p. 52-59

Langen T. A., 2009, Predictive models of herpetofauna road mortality hotspots in extensive road networks: three approaches and a general procedure for creating hotspot models that are useful for environmental managers. Dans les actes de la conférence ICOET 2009 (International Conference on Ecology and Transportation): wildlife-vehicle collisions, data collection, monitoring and modeling, p. 475-486

Larrère C., Larrère R., 1997, Le contrat domestique. Le Courier de l'environnement de l'INRA, numéro 30, p. 5- 17

Le Corre M., Pellerin M., Pinaud D., Van Laere G., Fritz H., Saïd S., 2008, A multi-patch use of habitat: testing the First-Passage Time analysis on roe deer *Capreolus capreolus* paths. Wildlife Biology, Volume 14 (3), 11 p.

Le Gléau J.-P., Pumain D., Saint-Julien T., 1997, Towns of Europe: to each country its definition. INSEE Studies, numéro 6, novembre 1997, p. 1-15

Le Guillou G., 2009, Suivi de la population de goélands marins *Larus marinus* de la ville du Havre, des autres colonies de Haute-Normandie et de l'îlot du Ratier. Étude du Groupe Ornithologique Normand, Ville du Havre, 27 p.

Le Guyader H., 2002, Doit-on abandonner le concept d'espèce ? Le courrier de l'environnement de l'INRA, numéro 46, enligne [http://www7.inra.fr/dpenv/sommrc46.htm]

Lecomte J., 2006, La Nature singulière ou plurielle ? Connaître pour protéger. Les dossiers de l'environnement de l'INRA, Éditions Quae, 61 p.

Lee L.-L., 1997, Effectiveness of live traps and snap traps in trapping small mammals in Kinnen. Acta Zoologica Taiwanica, Volume 8 (2), p 79-85

Letty J. Aubineau J., Peroux R., Marchandeau S., 2005, Les lagomorphes et les infrastructures de transport : impacts et propositions pour les populations de lapins et de lièvres. Actes du colloque – 4ème rencontre Routes et faune sauvage, 21-22 septembre 2005, Chambéry, p. 59-68

Lévy J., Lussault M., 2003, Dictionnaire de la Géographie et de l'Espace des Sociétés. Sous la direction de, Éditions Belin, Paris, 1034 p.

Li H., Wu J., 2004, Use and misuse of landscape indices. Landscape Ecology, Volume 19, p. 389-399

Liagre F., 2006, Les haies rurales, rôles, création, entretien. Édition France Agricole, 320 p.

Liro A., Glowacka I., Jakubowski W., Kaftan J., Matuszliewicz A. J., Szacki J., 1995, National Ecological Network EECONET - Poland. Programme européen IUCN, Fondation IUCN de Pologne, 66 p.

Little S. J., Harcourt R. G., Clevenger A. P., 2002, Do wildlife passages act as prey-traps? Biological Conservation, Volume 107, p. 135-145

Lizet B., de Ravignan F., 1987, Comprendre un paysage : guide pratique de recherche. INRA, Paris, 143 p.

Lloyd H. G., 1980, Habitat requirements of the red fox. Biogeographica: the Red Fox. Symposium on Behaviour and Ecology, Volume 18. Édition E. Zimen, p. 7-25

Loarie S. R., Van Aarde R. J., Pimm S. L., 2009, Fences and artificial water affect African Savannah elephant movement patterns. Biological Conservation, Volume 142, p. 3086-3098

Louchart F., 2011, L'orang-outan de Bornéo va-t-il disparaître ? Courrier de l'environnement de l'INRA, numéro 60, mai 2011, p. 77-89

Lovallo M. J., Anderson E. M., 1996, Bobcat movements and home ranges relative to roads in Wisconsin. Wildlife Society Bulletin, Volume 24, p. 71-76

Luginbühl Y., 2007, Pour un paysage du paysage. Économie rurale, p. 297-298, en ligne, [http://economierurale.revues.org/1931]

Lüsher P., Weibel R., 2013, Exploiting empirical knowledge for automatic delineation of city centers from large-scale topographic database. Computers, Environment and Urban Systems, Volume 37 (1), p. 18-34

MacArthur R. H., Wilson E. O., 1963, An equilibrium theory of insular zoogeography. Evolution, Volume 17 (4), décembre 1963, p. 373-387

Mader H.-J., 1984, Animal habitat isolation by roads and agricultural fields. Biological Conservation, Volume 29 (1), p. 81-96

Mader H. J., Schell C., Kornacker P., 1990, Linear barriers to arthropod movements in the landscape. Biological Conservation, Volume 54, p. 209-222.

Madison D. M., 1980, Movement types and weather correlates in free-ranging meadow voles. Eastern Pine and Meadow Vole Symposia, p. 34-42

Maes P., 1991, A Bottom-up mechanism for behavior selection in an artificial creature. Dans From Animals to Animats, Actes de la 1ère conférence internationale Simulation of Adaptive Behavior (SAB 1990). Édition Meyer & Wilson, MIT Press, p. 238-246

Marchand G., 2012 [a], Les conflits hommes/animaux sauvages sous le regard de la géographie. Cadre territorial, perceptions et dimension spatiale. Carnets de géographies, numéro 5, en ligne, [http://www.carnetsdegeographes.org]

Marchand G., 2012 [b], Nos voisines, les bêtes : situation des conflits avec la faune sauvage dans une aire protégées de la périphérie de Manaus (Amazonas, Brésil). Développement durable et territoires, Volume 3, numéro 1, en ligne, 17 p.

Marchandeau S., Landry P., Aubineau J., Berger F., Léonard Y., Letty J., Roobrouck A., 2003, Approche spatiale de la fragmentation des populations chez le lapin de garenne. Rapport scientifique 2002, ONCFS, 7 p.

Marchandeau S., Devillard S., Aubineau J., Berger F., Léonard Y., Roobrouck A., 2007, Domaine vital chez le lapin de garenne dans trois populations contrastées. ONCFS, rapport scientifique 2007, p. 33-37

Markham A. C., Wilkinson A. J., 2008, EcoLocate: a heterogeneous wireless network system for wildlife tracking. Novel Algorithms and Techniques in Telecommunications, Automation and Industrial Electronics. Éditions T. Sobh et al, p. 293-298

Marsh D. M., Milam G. S., Gorham N. P., Beckam N. G, 2005, Forest Roads as Partial Barriers to Terrestrial Salamander Movement. Conservation Biology, Volume 19 (6), décembre 2005, 5 p.

Massemin S., Zorn T., 1998, Highway mortality of barn owls in northeastern France. Journal of Raptor Research, Volume 32 (3), septembre 1998, p. 229-232

Mathieu P., Panzoli D., Picault S., 2011, FORMAT-STORE: a multi-agent based approach to experiental learning. Third International Conference on Games and Virtual Worlds for Serious Applications, VS-GAMES 2011, p. 120-127

McCarthy T. M., Fuller T. K., Munkhtsog B., 2005, Movements and activities of snow leopards in Southwestern Mongolia. Biological Conservation, Volume 124, p. 527-537

McFarland D., 2009, Le comportement animal – Physiologie, éthologie et évolution. Édition De Boeck, 613 p

McGarigal K., Cushman S. A., Neel M. C., and Ene E., 2002, FRAGSTATS v3: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical Maps. Computer software program produced by the authors at the University of Massachusetts, Amherst, en ligne, [http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html]

McGeoh M. A., Butchart S. H. M., Spear D., Marais E., Kleynhans E. J., Symes A., Chanson J., Hoffman M., 2010, Global indicators of biological invasion: species numbers, biodiversity impact and policy responses. Diversity and Distributions, Volume 16 (1), p. 95-108.

McGregor R. L., Bender D. J., Fahrig L., 2008, Do small mammals avoid roads because of the traffic? Journal of Applied Ecology, Volume 45, p. 117-123

McKinney M. L., 2006, Urbanization as a major cause of biotic homogenization. Biological Conservation, Volume 127, p. 247-260

McShea W. J., Madison D. M., 1992, Alternative approaches to study of small mammal dispersal: insights from radiotelemetry. Dans Stenseth N. C., Lidicker W. Z. J., Animal dispersal: small mammals as a model, Chapman and Hall, Londres, p. 319-332

Mechoud S., Hill D. R. C., Campos A., Orth D., Carrere P., Micol D., Poix C., Michelin Y., Coquillard P., Dumont B., 2000, Simulation Multi-Agents de l'entretien du paysage par des herbivores en moyenne montagne. Publications scientifiques et techniques de l'IRSTEA, en ligne, [http://wwwlisc.clermont.cemagref.fr/]

MEEDM, 2009, Plan national de maîtrise du sanglier. Un cadre d'actions techniques pour agir au plan départemental. Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durables et de la mer. 25 p.

Mefteh W., Bouju A., Malki J., 2012, Une approche ontologique pour la structuration de données spatio-temporelles de trajectoires. Application à l'étude des déplacements de mammifères marins. Revue internationale de géomatique, 2012, numéro 1, p. 55-75

Meia J.-S., 1994, Organisation sociale d'une population de renards (*Vulpes vulpes*) en milieu montagnard. Mémoire de thèse, Université de Neuchâtel, Suisse, 233 p.

Mennechez G., Clergeau P., 1999, Urbanisation et espèces généralistes : biologie comparée de la reproduction de l'Etourneau *Sturnus vulgaris* sur un gradient rural-urbain. Mémoire de thèse, Université Rennes 1, 242 p.

Mergey M., 2007, Réponses des populations de martres d'Europe (*Martes martes*) à la fragmentation de l'habitat : mécanismes comportementaux et conséquences. Mémoire de thèse en éco-éthologie, Université de Reims Champagne-Ardenne, 211 p.

Merriam G., Kozakiewicz M., Tsuchiya E., Hawley K., 1989, Barriers as boundaries for metapopulations and demes of *Peromyscus leucopus* in farm landscapes. Landscape Ecology, Volume 2 (4), p. 227-235

Metzger J.-P., Décamps H., 1997, The structural connectivity treshold: an hypothesis in conservation biology at the landscape scale. Acta Œcologica, Volume 18 (1), p. 1-12

Meunier F. D., Verheyden C., Jouventin P., 2000, Use of roadsides by diurnal raptors in agricultural landscapes. Biological Conservation, Volume 92 (3), mars 2000, p. 291-298

Micoud A., Bobbé S., 2006, Une gestion durable des espèces animales est-elle possible avec des catégories naturalisées ? Natures Sciences Sociétés, Volume 14 (supplément), p. 32-35

Micoud A., 2010, Sauvage ou domestique, des catégories obsolètes ? Sociétés, Volume 108 (2), p. 99-107

Miller H. J., 2005, What about people in geographic information science? Re-presenting GIS. Édité par P. Fisher et D. Unwin, 2005, John Wiley & Sons, Ltd, p. 215-242

Miller J. A., Maude G., 2010, Using correlated random walks to analyze interaction between Brown Hyena pairs in Northern Botswana. GIScience, Zurich, Suisse, 15-17 septembre 2010, 4 p.

Minvielle E., Souiah S.-A., 2003, L'analyse spatiale et statistique. Statistiques, cartographie, télédétection, SIG. Éditions de Temps, 284 p.

MIRO, 2006, Modélisation Intra-Urbain des rythmes quotidiens, Rapport d'étape numéro 2, année 2005-2006, Génération d'une population « synthétique » d'agents. PREDIT 2002-2006, 37 p.

Moine A., 2005, Le territoire comme un système complexe. Des outils pour l'aménagement et la géographie. Actes des septièmes rencontres de Théo Quant, janvier 2005, 11 p.

Morellet N., Verheyden H., Angibault J.-M., Cargnelutti B., Lourtet B., Hewison M. A. J., 2009, The effect of capture on ranging behaviour and activity of the European Roe Deer *Capreolus capreolus*. Wildlife Biology, Volume 15 (3), p. 278-287

Morellet N., Van Moorter B., Cargnelutti B., Angibault J.-M., Lourtet B., Merlet J., Ladet S., Hewison A. J. M., 2011, Landscape composition influences roe deer habitat selection at both home range and landscapes scales. Landscape Ecology, Volume 26, p. 999-1010

Morellet N., Goulard M., 2012, Sélection de l'habitat et déplacement du chevreuil dans un paysage agricole moderne. Chaire Modélisation, Mathématique et Biodiversité du Centre de Mathématiques Appliquées, présentation en ligne, [http://www.cmap.polytechnique.fr/chaire-mmb/]

Moreno-Rueda G., Pizarro M., 2009, Relative influence of habitat heterogeneity, climate, human disturbance, and spatial structure on vertebrate species richness in Spain. Ecological Research, Volume 24, p. 335-344

Moriceau J.-M. Madeline P., 2010, Repenser le sauvage grâce au retour du loup : les sciences humaines interpellées. Presses Universitaires de Caen, 254 p.

Mouron D., Padern F., Boisaubert B., 1997, Inventaire des espaces de libre circulation du cerf élaphe (*Cervus elaphus*) en France. Acte du Congrès de l'Union internationale des biologistes du gibier, septembre 1997, Lyon, 1 p.

Mulhauser B., Zimmermann J.-L., 2008, Suivi à long terme d'une population de gélinotte des bois *Bonasa bonasia* à l'aide de la bioacoustique. Actes du 32ème Colloque Francophone d'Ornithologie, Paris, 2008, 13 p.

Müller J.-P., Aubert S., 2012, Formaliser les rôles et les territoires par les systèmes multi-agents institutionnels. Actes des 20ème journées francophones sur les systèmes multi-agents, JFSMA'12, 17-19 octobre 2012, Honfleur, France, Cépaduès Éditions, p. 13-22

Multon F., 2010, Analyse, modélisation et simulation du mouvement humain. Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Rennes 1, 118 p.

Musiani M., Anwar S. M., McDermid G. J., Hebblewhite M., Marceau D. J., 2010, How humans shape wolf behavior in Banff and Kootenay National Parks, Canada. Ecological Modelling, Volume 221, p. 2374-2387

Mysterud A., 1999, Seasonal migration pattern and home range of roe deer (*Capreolus capreolus*) in an altitudinal gradient in southern Norway. Journal of Zoology, London, Volume 247, p. 479-486

Náhlik A., Sándor G., Tari T., Király G., 2009, Space use and activity patterns of red deer in a highly forested and in a patchy forest-agricultural habitat. Acta Silvatica & Lignaria Hungarica, Volume 5, p. 109-118

Nakazono T., Ono, Y., 1987, Den distribution and den use by red fox (*Vulpes vulpes japonica*) in Kyushu. Ecological Research, Volume 2, p. 265-277

Nathan R., Getz W. M., Revilla E., Holyoak M., Kadmon R., Saltz D., Smouse P. E., 2008, A movement ecology paradigm for unifying organismal movement research. PNAS, Volume 105, numéro 49, p. 19052-19059

Nellemann C., Vistnes I., Jordhoy P., Strand O., 2001, Winter distribution of wild reindeer in relation to power lines, roads and resorts. Biological Conservation, Volume 101, p. 351-360

Netzer M., Whigham P., Dickinson K., Lord J., 2007, Spatial analysis of home range, core area and habitat selection of red deer (*Cervus elaphus*) on an extensively managed high-country station. SIRC 2007: 19th Annual Colloquium of the Spatial Information Research Centre, New Zealand, 6-7 décembre 2007, 8 p.

Neutens T., Schwanen T., Witlox F., 2011, The prism of everyday life: towards a new research agenda for Time Geography. Transport Reviews, Volume 31 (1), p. 25-47

Neyroumande E., Vallauri D., 2011, Regards sur la politique des forêts en France. Rapport, World Wide Fund for nature, France, 42 p.

Noël M., 2007, Des sciences citoyennes ? La question de l'amateur dans les sciences naturalistes. Dans Charvolin F., Micoud A., Nyhart L. (coordinateur). *Revue d'anthropologie des connaissances*, Volume 3 (3), Éditions de l'Aube, Paris. p. 550-553

Note P., Poix C., 2006, Simulations spatialisées des pullulations de campagnols terrestres : Étude de l'influence des structures paysagères. Cybergeo : European Journal of Geography, en ligne, [http://cybergeo.revues.org/3219]

Nuninger L., Sanders L., Favory F., Garmy P., Raynaud C., Rozenblat C., Kaddouri L., Mathian H., Schneider L., 2006, La modélisation des réseaux d'habitat en archéologie : trois expériences. Mappemonde, numéro 83 (3), en ligne, [http://mappemonde.mgm.fr/]

O'Keefe J., Nadel L., 1978, The hippocampus as a cognitive map. Oxford University Press 1978, Londres, 570 p.

Offner J.-M., 1993, Les « effets structurants » du transport : mythe politique, mystification scientifique. L'Espace Géographique, Volume 22 (3), p. 233-242

Oliveira-Santo L. G. R., Zucco C. A., Antunes P. C. Crawshaw P. G. J., 2009, Is it posible to individually identify mammals with no natural markings using camera-traps? A controlled case-study with lowland tapirs. Mammalian Biology, 4 p.

ONCFS, 2007, Le chevreuil *Capreolus capreolus*. Fiche descriptive, 2 p.

ONCFS, 2008, Rapport scientifique ONCFS 2008. 64 p.

ONCFS, 2010, Bulletin d'information du Réseau Lynx. Numéro 16 de janvier 2009 à juin 2010, 52 p.

Olsvig-Whittaker, Weil G., Amir S., Walczak M., Steinitz O., Natan G. B., 2013, Survey and monitoring for conservation in Israel using EBONE approaches. Conférence IALE Europe, Manchester, 9-12 septembre 2013, 2 p.

Paillat G., Butet A., 1994, Fragmentation et connectivité dans les paysages : importance des habitats corridors pour les petits mammifères. ARVICOLA, Tome VI, numéro 2, p. 5-12

Palma A. T., Bogorny V., Kuijpers B., Alvares L. O., 2008, A clustering-approach for discovering interesting places in trajectories. Conférence ACM Symposium on Applied Computing (SAC), Fortaleza, Brésil, 16-20 mars 2008, 6 p.

Panzacchi M., Linnell J. D. C., Serrao G., Eie S., Odden M., Odden J., Andersen R., 2008, Evaluation of the importance of roe deer fawns in the spring-summer diet of red-foxes in southeastern Norway. Ecological Research, Volume 23, p. 889-896

Papastamatiou Y. P., Cartamil D. P., Lowe C. G., Meyer C. G., Wetherbee B. M., Holland K. N., 2011, Scales of orientation, directed walks and movement path structure in sharks. Journal of Animal Ecology, Volume 80 (4), p. 864-874

Paquet P. C., Callaghan C., 1996, Effects of linear developments on winter movements of gray wolves in the bow river valley of Banff National Park, Alberta. Dans: Evink G., Ziegler D., Garrett P., Berry J. Trends in addressing transportation related wildlife mortality, 22 p.

Parise C., Galand N., Hervé C., 2012, Reproduction de la Pipistrelle de Nathusius, (*Pispistrellus nathusii*) (Keyserling & Blasius, 1839) au lac du Der-Chantecoq (Champagne-Ardenne). Symbioses, 2012, nouvelle série, numéro 28, p. 7-13

Parkes C., 2003, VHF radio-telemetry monitoring of satellite tracked migrating Black Storks (*Ciconia nigra*) across the Straits of Gibraltar. Aves, Volume 40 (1-4), p. 122-126

Parr J. W. K., Duckworth J. W., 2007, Notes on diet, habituation and sociality of Yellow-throated Marten *Martes flavigula*. Small Carnivore Conservation, Volume 36, p. 27-29

Patthey P., 2003, Habitat and corridor selection of an expanding red deer (*Cervus elaphus*) population. Mémoire de thèse de doctorat. Université de Lausanne, 158 p.

Pavard I., 2006, Contribution à la construction du réseau écologique national - Bilan de l'historique et des expériences de réseau écologique en Europe. France Nature Environnement, 239 p.

Pellerin M., 2005, Utilisation et sélection de l'habitat chez le chevreuil à différentes échelles spatio-temporelles. Mémoire de thèse en Ingénierie chimique, biologique et géologique, Université de Poitiers, 290 p.

Pellerin M., Calenge C., Saïd S., Gaillard J.-M., Fritz H., Duncan P., Van Laere G., 2010, Habitat use by female western roe deer (*Capreolus capreolus*): influence of resource availability on habitat selection in two contrasting years. Canadian Journal of Zoology, Volume 88, p. 1052-1062

Pellissier V., Cohen M., Boulay A., Clergeau P., 2012, Birds are also sensitive to landscape composition and configuration within city centre. Landscape and Urban Planning, Volume 104, p. 181-188

Pereboom V., 2006, Mode d'utilisation du milieu fragmenté par une espèce forestière aux habitudes discrètes, la martre des pins *Martes martes*. Thèse de doctorat en Biologie des organismes, Université d'Angers, soutenu le 6 décembre 2006, 75 p.

Pereira V., 2006, Préconisations techniques pour l'exploitation et la conversion des peuplements forestiers allochtones en bordure des ruisseaux. Office National des Forêts, juillet 2006, 16 p.

Pfaff E., Klein F., Saint-Andrieux C., Guibert B., 2008, La situation du cerf élaphe en France. Résultats de l'inventaire 2005. Faune sauvage, numéro 280, avril 2008, p. 40-50

Pickett S. T. A., White P. S., 1986, The Ecology of Natural Disturbance and Patch Dynamics. Édition Academic Press, 472 p.

Piombini A., 2007, Apport d'un formalisme psychologique à la modélisation des préférences individuelles. Actes de la conférence SAGEO 2007, Clermont-Ferrand, 17 p.

Plumptre A. J., 1994, The effets of trampling damage by herbivores on the vegetation of the Parc National des Volcans, Rwanda. African Journal of Ecology, Volume 32 (2), p. 115-129

PNR des Vosges du Nord, 1997, Le Parc naturel régional des Vosges du Nord. Éditions PEMF, 24 p.

Ponçon N., Dacheux L., Picard E., Debaere O., Bronner A., Cliquet F., Bourhy H., 2010, La rage en France métropolitaine : bilan de la situation actuelle. Bulletin Epidémiologique, Santé animale – alimentation, numéro 39, septembre 2010, p. 2-4

Pouliot R., Dussault C., Côté S. D., 2004, Validation des indices d'activité de colliers GPS et étude de l'activité du cerf de Virginie à l'île d'Anticosti en été. Rapport de recherche, Université de Laval, 42 p.

Poulle M.-L., 1991, Éco-éthologie du renard roux (*Vulpes vulpes*) en Lorraine. Influence du mode de distribution des ressources sur le partage de l'espace. Mémoire de thèse, Université de Strasbourg I, 191 p.

Préau P., 1964, Le parc national de la Vanoise banc d'essai d'une politique d'aménagement de la montagne. Revue de géographie alpine, Volume 52 (3), p. 393-436

Preisler H., Ager A. A., Johnson B. K., Kie J. G., 2004, Modeling animal movements using stochastic differential equations. Environmetrics, Volume 15, p. 643-657

Puissant A., Zhang W., Skupinski G., 2012, Extraction et caractérisation des éléments arborées en milieu urbain – application à Strasbourg. Séminaire du GDR MAGIS suivi des milieux, 24 janvier 2012, Paris, présentation en ligne, [https://gdr-magis.imag.fr/]

Quénol H., Bridier S., Vergne O., Dubreuil V., 2007, Apport de la géomatique pour la caractérisation de l'Ilot de Chaleur Urbain à Rennes (France). Actes du Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brésil, 21-26 avril 2007, p. 5467-5469

Raap E., 2013, Monitoring small landscape elements as indication for quality of landscape and biodiversity. Actes de la conférence IALE 2013, Manchester, UK, 2 p.

Rabinowitz A., Zeller K. A., 2010, A range-wide model of landscape connectivity and conservation for the jaguar, *Panthera onca*. Biological Conservation, Volume 143, p. 939-945

Railsback S. F., 2001, Concepts from complex adaptive systems as a framework for individual-based modelling. Ecological Modelling, Volume 139, p. 47-62

Ramousse R., Le Berre M., Giboulet O., 1999, La Marmotte alpine. Courrier de l'environnement de l'INRA, Numéro 36, mars 1999, p. 39-52

Ramp D., Caldwell J., Edwards K. A., Warton D., Croft D. B., 2005, Modelling of wildlife fatality hotspots along the Snowy Mountain Highway in New South Wales, Australia. Biological Conservation, Volume 123, p. 474-490

Ratikainen I. I., 2005, Winter habitat use of roe deer (*Capreolus capreolus*) in the presence of lynx (*Lynx lynx*). Mémoire de master, Université d'Oslo, 50 p.

Raton V., 2004, L'échinococcose alvéolaire en milieu urbain : mise en place d'une étude épidémiologique sur la ville de Pontarlier. Entente Rage Zoonose, Mémoire de fin d'études, Isara Lyon, 138 p.

RFF, 2011, LGV Est européenne 2ème phase. Protéger la biodiversité. Réseau Ferré de France, juin 2011, 13 p.

Richard J.-F., 1973, Essai de définition de la géographie du paysage. Centre National de la Recherche Scientifique, Groupe de recherche sur les équilibres des paysages, cahiers numéro 4, 91 p.

Richard E., Gaillard J.-M., Saïd S., Hamann J.-L., Klein F., 2010, High red deer density depresses body mass of roe deer fawns. Oecologia, Volume 163, p. 91-97

Richard E., Saïd S., Hamann J.-L., Gaillard J.-M., 2011, Toward an identification of resources influencing habitat use in a multi-specific context. PLoS ONE, Volume 6 (12), 9 p.

Rico A., Kindlmann P., Sedlacek F., 2007, Barrier effects of roads on movements of small mammals. Folia Zoology, Volume 56 (1), p. 1-12.

Rivals C., Artois M., 1996, Le renard sauvage et familier, un miroir de l'homme ? Le Courrier de l'environnement, numéro 29, en ligne, [http://www.inra.fr/dpenv/rivalc29.htm]

Robardet E., 2007, Étude de la transmission d'*Échinococcus multilocularis* dans une grande agglomération : influence du comportement alimentaire et de l'utilisation de l'espace par le renard roux (*Vulpes vulpes*) sur la contamination de l'environnement. Mémoire de thèse en Sciences de la Vie et de la Santé, Université de Franche-Comté, 173 p.

Roberge J.-M., Angelstam P., 2004, Usefulness of the umbrella species concept as a conservation tool. Conservation Biology, Volume 18 (1), p. 76-85

Rodary E., Castellanet C., Rossi G., 2003, Conservation de la nature et développement : l'intégration impossible. Éditions Karthala, Collection « Économie et développement », Paris, 308 p.

Rodríguez A., Crema G., Delibes, M., 1997, Factors affecting crossing of red foxes and wild cats through non-wildlife passages across a high-speed railway. Ecography, Volume 20, p. 287-294.

Rogers L. L., 1988, Homing tendencies of larger mammals: A review. Dans Nielsen L., Brown R. D., eds. Translocation of wild animals, p. 76-92

Rosatte R., Allan M., 2009, The ecology of red foxes, *Vulpes vulpes*, in Metropolitan Toronto, Ontario: disease management implications. Canadian Field-Naturalist, Volume 123 (3), p. 215-220

Rossi I., Lamberti P., Mauri L., Apollonio M., 2001, Male and female spatial behaviour of roe deer in a mountainous habitat during pre-rutting and rutting period. Journal of Mountain Ecology, Volume 6, p. 1-6

Rovéra G., Martin B., 1998, L'entretien des haies garant de leur diversité : le bocage du Champsaur (Hautes-Alpes, France). Revue de Géographie, Volume 95 (1), p. 19-32

Ruas A., 1999, Modèle de généralisation de données géographiques à base de contraintes et d'autonomie. Mémoire de thèse de doctorat, Université de Marne-la-Vallée, 323 p.

Ruas A., 2013, 3D et Généralisation, présentation à la Journée SIG3D du GdrMAGIS, 24 mai 2013, 45 p.

Ruette S., 2003, Méthode de suivi des populations de renard : évaluation récentes et perspectives. Rapport scientifique 2002 ONCFS, juillet 2003, p. 1-5.

Rumbaugh J., Blaha M., Premerlani W., Eddy F., Lorensen W., 1991, Object-oriented modeling and design. Édition Prentice-Hall, New Jersey, 500 p.

Rydell J., Bach L., Dubourg-Savage M.-J., Green M., Rodrigues L., Hedenström, 2010, Bat mortality at wind turbines in northwestern Europe. Acta Chiropterologica, Volume 12 (2), décembre 2010, p. 261-274

Sage M., 2008, Transfert de bromadiolone (appâts/sols – campagnols de prairie – renards) : Étude environnementale de la persistance et mesure indirecte de l'exposition. Mémoire de thèse, Université de Franche-Comté, 227 p.

Saïd S., Gaillard J.-M., Duncan P., Guillon N., Guillon N., Servanty S., Pellerin M., Lefeuvre K., Martin C., Van Laere G., 2005, Ecological correlates of home-range size in spring-summer for female roe deer (*Capreolus capreolus*) in a deciduous woodland. Journal Zoology, The Zoological Society of London, Volume 267, p. 301-308

Saïd S., Servanty S., 2005, The influence of landscape structure on female roe deer home-range size. Landscape Ecology, Volume 20, p. 1003-1012

Saïd S., Gaillard J.-M., Widmer O., Débias F., Bourgoin G., Delorme D., Roux C., 2009, What shapes intra-specific variation in home range size? A case study of female roe deer. OIKOS, Volume 118, p. 1299-1306

Salvatori V., Linnell J., 2005, Report on the conservation status and threats for wolf (*Canis lupus*) in Europe. Conseil de l'Europe, 27 p.

Sarrat C., Lemonsu A., Masson V., Guedalia D., 2006, Impact of urban heat island on regional atmospheric pollution. Atmospheric Environment, Volume 40, p. 1743-1758

Sauvet G., Layton R. H., Lenssen-Erz T., López-Montalvo E., Taçon P., Wlodarczyk A., 2010, De l'iconographie d'un art rupestre à son interprétation anthropologique. Sous la direction de Clottes J., *L'art pléistocène dans le monde*, Actes du Congrès IFRAO, International Federation of Rock Art Organizations, Tarascon-sur-Ariège, septembre 2010, p. 1763-1776.

Scheik B. K., Jones M. D., 1999, Locating wildlife underpasses prior to expansion of highway 64 in North Carolina. Actes de la 3ème International Conference on Wildlife Ecology and Transportation, p. 247-251

Schmidt K., Jedrzejewski W., Okarma H., Kowalczyk R., 2009, Spatial interactions between grey wolves and Eurasian lynx in Bialowieza Primeval Forest, Poland. Ecological Research, Volume 24, p. 207-214

Schulz M.-C., Vilain L., 2008, Mettre en place des infrastructures agroécologiques (IAE) sur son exploitation : pourquoi ? comment ? Rapport France Nature Environnement. 34 p.

Schulze E. D., Mooney H. A., 1994, Biodiversity and ecosystem function. Édition Springer, 556 p.

Schwartz C., Swenson J. E., Miller S. D., 2003, Large carnivores, moose, and humans: a changing paradigm of predator management in the 21th century. Alces, Volume 39, p. 41-63.

Schwarzkopf L., Alford R. A., 2002, Nomadic movement in tropical toads. OIKOS, Volume 96, p. 492-506

Scolozzi R., Geneletti D., 2009, An approach to assess landscape functional connectivity at local scale. European IALE Conference 2009 (International Association for Landscape Ecology), Salzbourg & Bratislava, p. 372-378

Scull P., Palmer M., Frey F., Kraly E., 2012, A comparison of two home-range modeling methods using Ugandan mountain gorilla data. International Journal of Geographical Information Science, Volume 26 (11), p. 2111-2121

Seiler A., 2001, Ecological effects of roads, a review. Introductory Research Essay, Department of Conservation Biology, 40 p.

Servigne S., Devogele T., Bouju A., Bertrand F., Gutierrez C., Laucius S., Noel G., Ray C., 2007, Gestion de masses de données temps réel au sein de bases de données capteurs. Actes de la conférence SAGEO 2007, Clermont-Ferrand, 18-19 juin, 14 p.

Sétra, 2000, Fragmentation de l'habitat due aux infrastructures de transport. État de l'art. Rapport de la France. Rapport COST-Transport, 196 p.

Sétra, 2005, A28, section Alençon-Le Mans, analyse des données de collisions impliquant la faune. 4ème rencontres *Routes et petite faune sauvage*, 21-22 septembre 2005, Chambéry, 1 p.

Sétra, 2006, Routes et passages à faune, 40 ans d'évolution. Rapport de bilan d'expériences, août 2006, 57 p.

Sétra, 2007, Faune et trafic. Manuel européen d'identification des conflits et de conception de solutions. Service d'études techniques des routes et autoroutes, Rapport COST 341, Cassignol J., septembre 2007, 179 p.

Sétra, 2008, Clôtures routières et faune. Critères de choix et recommandations d'implantation. Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements, Note d'information série Économie Environnement Conception, numéro 86, septembre 2008, 22 p.

Sgard A., 2010, Le paysage dans l'action publique : du patrimoine au bien commun. Développement durable et territoire, Volume 1, numéro 2, septembre 2010, en ligne, [http://developpementdurable.revues.org/8565].

Shephard D. B., Kuhns A. R., Dreslik M. J., Phillips C.A., 2008, Road as barriers to animal movement in fragmented landscapes. Animal Conservation, Volume 11, p. 288-296

Shochat E., Warren P. S., Faeth S. H., McIntyre N. E., Hope D., 2006, From patterns to emerging processes in mechanistic urban ecology. TRENDS in Ecology and Evolution, Volume 21 (4), p. 186-191

Sigaud F., 2003, L'échinococcose alvéolaire en milieu urbain : définition d'une stratégie d'étude au travers de l'exemple de l'agglomération d'Annemasse. Mémoire de thèse de doctorat, École Nationale Vétérinaire de Lyon, 122 p.

Simberloff D. S., Wilson E. O., 1969, Experimental zoogeography of islands: the colonization of empty islands. Ecology, Volume 50 (2), mars 1969, p. 278-296

Smith D. L., Lucey B., Waller L. A., Childs J. E., Real L. A., 2002, Predicting the spatial dynamics of rabies epidemics on heterogeneous landscapes. PNAS Proceedings of the National Academy of Sciences, Volume 99 (6), p. 3668-3672

Soanes K., Van Der Ree R., 2009, Highway impacts on arboreal mammals and the use and effectiveness of novel mitigation techniques. International Conference on Ecology and Transportation, 13-17 septembre 2009, Duluth, Minnesota, 17 p.

Soisalo M. K., Cavalcanti S. M. C., 2006, Estimating the density of jaguar population in the Brazilian Pantanal using camera-traps and capture-recapture sampling in combination with GPS radio-telemetry. Biological Conservation, Volume 129, p. 487-496

Sordello R., Amsallem J., Dubus V., 2012, Trame verte et bleue. Suivi et évaluation. Quelle faisabilité d'utiliser l'outil génétique ? Rapport du Service du Patrimoine Naturel 2012, novembre 2012, 35 p.

Spaccapietra S., Parent C., Damiani M. L., de Macedo J. A., Porto F., Vangenot C., 2008, A conceptual view on trajectories. Data Knowledge Engineering, Volume 65 (1), p. 126-146

Speight M., 1989, Saproxylic invertebrates and their conservation. Publication du Conseil de l'Europe, Strasbourg, 78 p.

Speziale K. L., Lambertucci S. A., Olsson O., 2008, Disturbance from roads negatively affects Andean condor habitat use. Biological Conservation, Volume 141, p. 1765-1772

Stache A., Löttker P., Heurich M., 2012 Red deer telemetry: dependency of the position acquisition rate and accuracy of GPS collars on the structure of a temperate forest dominated by European beech and Norway spruce. Silva Gabreta, Volume 18 (1), p. 35-48

Staines B. W.n 1976, The use of natural shelter by Red deer (*Cervus elaphus*) in relation to weather in North-east Scotland. Journal of Zoology. Volume 180 (1), p. 1-8

Steiniger S., Hunter A. J. S., 2013, A scaled line-based kernel density estimator for the retrieval of utilization distributions and home ranges from GPS movement tracks. Ecological Informatics, Volume 13, p. 1-8

Stevens V. M., Verkenne C., Vandewoestijne S., Wesselingh R. A., Baguette M., 2006, Gene flow and functional connectivity in the natterjack toad. Molecular Ecology, Volume 15, p. 2333-2344

Stewart K. M., Bowyer R. T., Kie J. G., Hurley M. A., 2010, Spatial distributions of Mule Deere and North American Elk: resource partitioning in a sage-steppe environment. American Midland Naturalist Journal, Volume 163, p. 400-412

Storms D., Saïd S., Hamann J.-L., Klein F., 2004, Détermination intra-interspécifiques de la sélection de l'habitat par le cerf et le chevreuil en milieu forestier. ONCFS Rapport scientifique 2004, p 56-59

Storms D., Aubry P., Hamann J.-L., Saïd S., Fritz H., Saint-Andrieux C., Klein F., 2008, Seasonal variation in diet composition and similarity of sympatric red deer *Cervys elaphus* and roe deer *Capreolus capreolus*. Wildlife Biology, Volume 14 (2), p. 237-250

Stotyn S., Serrouya R., McLellan B., 2005, The predator-prey dynamics of wolves and moose in the northern Columbia Mountains: spatial and functional patterns in relation to mountain Caribou decline. Columbia Basin Fish and Wildlife Compensation Program, British Columbia Forest Science Program, 22 p.

Suttie J. M., Goodall E. D., Pennie K., Kay R. N. B., 1983, Winter food restriction and summer compensation in red deer stags (*Cervus elaphus*). British journal of Nutrition, Volume 50, p. 737-747

Tabaka K., 2009, Vers une nouvelle socio-géographie de la mobilité quotidienne. Étude des mobilités quotidiennes des habitants de la région urbaine de Grenoble. Mémoire de thèse en géographie, Université Joseph-Fourier Grenoble I, 354 p.

Tablado Z., Loison A., Said S., Bourgoin G., 2010, Différences inter-spécifiques du déplacement de grands herbivores en milieu alpin. Ecologie 2010, Colloque national d'écologie scientifique, 2-4 septembre 2010, Montpellier

Taylor P. D., Fahrig L., With K. A., 2006, Landscape connectivity: a return to the basics. In Crooks K. R., Sanjayan M. Connectivity Conservation. Édition Cambridge University Press, p. 29-43

Teagle W. G., 1967, The fox in the London suburbs. London Naturalist, p. 44-63.

Tesnière M.-H., 2005, Bestiaire médiéval : Enluminures. Édition Bibliothèque Nationale de France, 240 p.

Theobald D. M., 2001, Topology revisited: representing spatial relations. International Journal of Geographical Information Science, Volume 15 (8), p. 689-705

Thévenin T., Chardonnel S., Cochey É., 2007, Explorer les temporalités urbaines de l'agglomération de Dijon. Une analyse de l'Enquête-Ménage-Déplacement par les programmes d'activités. Espace populations sociétés, 2007, numéro 2-3, p. 179-190

Thévenot C., 2003, L'Entente interdépartementale de lutte contre la rage et les autres zoonoses : son histoire, ses actions. Mémoire de thèse, École Nationale Vétérinaire d'Alfort, 150 p.

Thirgood S., Scott D., Irvine J., Palmer S., Gilert L., Leckie F., Elston D., 2007, Developing methodologies to monitor deer movements at the landscape scale. NERC/Centre for Ecology and Hydrology, 156 p.

Thomas A., 2003, Étude des variations spatio-temporelles dans la taille des domaines vitaux des chevrettes. Mémoire de Maîtrise, Université de Poitiers, CNRS, 25 p.

Thonnerieux Y., 2005, Éoliennes et oiseaux : quelles conséquences ? Courrier de la Nature, numéro 218, p. 27-33

Tolman E. C., 1948, Cognitive maps in rats and men. Psychological Review, Volume 55 (4), p. 189-208

Tolman E. C., Ritchie B. F., Kalish D., 1946, Studies in spatial learning: I. Orientation and the short-cut. Journal of experimental psychology, Volume 36, p. 13-24

Tolon V., Baubet É., 2010, L'effet des réserves sur l'occupation de l'espace par le sanglier. Faune sauvage, numéro 288, p. 14-18

Topping C. J., Hansen T. S., Jensen T. S., Jepsen J. U., Nikolajsen F., Odderskaer P., 2003, ALMaSS, an agent-based model for animals in temperate European landscape. Ecological Modelling, Volume 167, p. 65-82

Trombulak S. C., Frissell C. A., 2000, Review of ecological effects of roads on terrestrial and aquatic communities. Conservation Biology, Volume 14 (1), février 2000, p. 18-30

Torrens P. M., Nara A., Li X., Zhu H., Griffin W. A., Brown S. B., 2012, An extensible simulation environment and movement metrics for testing walking behavior in agent-based models. CEUS, Computers, Environment and Urban Systems, Volume 36 (1), p. 1-17

Torres R. T., Carvalho J. C., Panzacchi M., Linnell J. D. C., Fonseca C., 2011, Comparative use of forest habitats by roe deer and moose in a human-modified landscape in southeastern Norway during winter. Ecological Research, Volume 26, p. 781-789

Touya G., Duchêne C., Mustière S., 2010, Généralisation et intégration pour un fond vert commun entre l'IFN et l'IGN. Revue Internationale de Géomatique, Volume 20 (1), p. 65-86

Treuil J.-P., Drogoul A., Zucker J.-D., 2008, Modélisation et simulation à base d'agents. Exemples commentés, outils informatiques et question théoriques. Éditions DUNOD, Sciences Sup Informatique, IRD, 322 p.

Trewhella W. J., Harris S., 1990, The effect of railway lines on urban fox (*Vulpes vulpes*) numbers and dispersal movements. Journal of Zoology, Volume 221, London, p. 321-326

Tsayem Demaze M., 2007, La déforestation en Amazonie brésilienne : une rupture apparente entre développement et environnement. Dans L'Amérique latine : identités et ruptures, sous la direction de Gélard J.-P. et Chemin A., p. 165-188

UICN France, MNHN, 2009, La Liste rouge des espèces menacées en France - Contexte, enjeux et démarche d'élaboration. Édition CARACTERE, Paris, 8 p.

UrbaLyon, 2010, Une mobilité fortement marquée par les déplacements automobiles. Dans : SCOT de l'agglomération lyonnaise. Rapport de présentation. Agence d'urbanisme de l'agglomération lyonnaise, p. 137-155

Van Bohemen H. D., 1998, Habitat fragmentation, infrastructure and ecological engineering. Ecological Engineering, Volume 11, p. 199-207

Van der Ree R., Heinze D., McCarthy M., Mansergh I., 2009, Wildlife tunnel enhances population viability. Ecology and Society, Volume 14 (2), 7 p.

Van der Sluis T., Bloemmen M., Bouwma I. M., 2004, European corridors: Strategies for corridor development for target species. Rapport de l'European Centre for Nature Conservation et Alterra, 32 p.

Van der Zande A. N., Ter Keurs W. J., Van der Weijden W. J., 1980, The impact of roads on the densities of four bird species in an open field habitat - evidence of a long-distance effect. Biological Conservation, Volume 18, p. 299-321

Vanpeene-Bruhier S., Berne B., 2005, Fréquentation par la petite faune de passages aménagés de l'Axe de Bièvre (Isère) : méthode de suivi et résultats. 4ème rencontre *Routes et petite faune sauvage*, 21-22 septembre 2005, Chambéry, 13 p.

Vanpeene S., Pissard P. A., 2012, Infrastructures de transport terrestre rail et route et modifications induites sur les paysages, les écosystèmes et la société. Analyses de méthodes et outils opérationnels. Programme de recherche ITTECOP, MEEDDM, 61 p.

Varaillon T., 1998, Approche multi-agents des problèmes de dénombrement de la faune et d'estimation de la biodiversité. Mémoire de DEA 1996-1997, Université Paris VI-VII, 26 p.

Vauclair J., 1980, Le rôle de la propriomotricité dans l'apprentissage d'un labyrinthe chez le hamster doré. L'Année Psychologique, Volume 80 (2), p. 331-351

Véron F., 1989, Éléments de réflexion sur la spécificité des systèmes spatiaux montagnards et leur gestion. Revue de géographie alpine, Volume 77, p. 211-225

Veyret Y., Simon L., 2006, Biodiversité, développement durable et Géographie. Annales des Mines, numéro 44, p. 76-83

Vignon V., Barbarreau H., 2008, Collisions entre véhicules et ongulés sauvages : quel coût économique ? Une tentative d'évaluation. Faune sauvage 279, février 2008, p. 31-35.

Vincent S., Nemoz M., Aulagnier S., 2011, Activity and foraging habitats of *Miniopterus schreibersii* (Chiroptera, Miniopteridae) in Southern France: implications for its conservation. Hystrix, the Italian Journal of Mammology, Volume 22 (1), p. 57-72

Voser M., Brauchli N., 2005, Évaluation standardisée des effets des passages à faune. Instructions pratiques. Édition de l'OFEFP, 4 p.

Vuillemier S., Metzger R., 2005, Animal dispersal modelling: Handling landscape features and related animal choices. Ecological Modelling, Volume 190, p. 159-170

Wakkinen W. L., Kasworm W. F., 1997, Grizzly bear and road density relationships in the Selkirk and Cabinet Yaak recovery zones. Publication de l'Interagency Grizzly Bear Committee, en ligne, [www.IGBConline.org], 29 p.

Walker K., Elliott G., Nicholls D., Murray D., Dilks P., 1995, Satellite tracking of wandering albatross (*Diomedea* exulans) from the Auckland islands: preliminary results. The Ornithological Society of New Zealand, Notornis, Volume 42, p. 127-137

Walker R. S., Novaro A. J., Branch L. C., 2007, Functional connectivity defined through cost-distance and genetic analyses: a case study for the rock-dwelling mountain vizcacha (*Lagidium viscacia*) in Patagonia, Argentina. Landscape Ecology, Volume 22, p. 1303-1314

Wandeler P., Funk S. M., Largiadièr C. R., Gloor S., Breitenmoser U., 2003, The city-fox phenomenon: genetic consequences of a recent colonization of urban habitat. Molecular Ecology, Volume 12 (3), p. 647-656

Watson A., Moss R., 2004, Impacts of ski-development on ptarmigan (*Lagopus mutus*) at Cairn Gorm, Scotland. Biological Conservation, Volume 116 (2), avril 2004, p. 267-275

Watts K. Handley P., 2010, Developing a functional connectivity indicator to detect change in fragmented landscapes. Ecological Indicators, Volume 10, p. 552-557

Wiens J. A., Milne B. T., 1989, Scaling of 'landscapes' in landscape ecology, or, landscape ecology from a beetle's perspective. Landscape Ecology, Volume 3 (2), p. 87-96

Wiens J. A., Stenseth N. C., Van Horne B., Ims R. A., 1993, Ecological mechanisms and landscape ecology. OIKOS, Volume 66, p. 369-380

With K. A., Gardner R. H., Turner M. G., 1997, Landscape connectivity and population distributions in heterogeneous environments. OIKOS, Volume 78, p. 151-169

Wong S. T., Servheen C. W., Ambu L., 2004, Home range, movement and activity patterns, and bedding sites of Malayan sun bears *Helarctos malayanus* in the rainforest of Borneo. Biological Conservation, Volume 19, p. 169-181

Woordward A., Beever E. A., 2011, Conceptual ecological models to support detection of ecological change on Alaska National Wildlife Refuges. U.S. Geological Survey Open-File Report 2011, 136 p.

Wynne-Edwards V. C., 1962, Animal dispersion in relation to social behaviour. Hafner publishing company, New York, 653 p.

Yoccoz N. G., Nichols J. D., Boulinier T., 2001, Monitoring of biological diversity in space and time. Trends in Ecology & Evolution, Volume 16 (8), août 2001, p. 446-453

Yom-Tov Y., 2001, Global warming and body mass decline in Israeli passerine birds. Proceedings of the Royal Society, B, Volume 268, Londres, p. 947-952

Yost A. C., Wright R. G., 2001, Moose, Caribou, and Grizzly Bear Distribution in Relation to Road Traffic in Denali National Park, Alaska. Artic, Volume 54 (1), p. 41-48

Yuan Y., Raubal M., Liu Y., 2012, Correlating mobile phone and travel behaviour–A case study of Harbin, China. CEUS Computer, Environment and Urban Systems, Volume 36 (2), mars 2012, p. 118-130

Zunga, Q., Vagnini, A., Le Page, C., Toure, I., Lieurain, E., Bousquet, F., 2000, Coupler Systèmes d'Information Géographique et Systèmes Multi-Agents pour modéliser les dynamiques de transformation des paysages. Le cas des dynamiques foncières de la moyenne Vallée du Zambèze (Zimbabwe). Colloque SMAGET : Modèles et Systèmes Multi-Agents pour la Gestion de l'Environnement et des Territoires, Clermont-Ferrand, 5-8 octobre 1998, en ligne, [http://cemadoc.irstea.fr/]

Zurcher A. A., Sparks D. W., Bennett V. J., 2010, Why the bat did not cross the road? Acta Chiropterologica, Volume 12 (2), décembre 2010, p. 337-340

PUBLICATIONS

Jolivet L., Cohen M., Ruas A., 2013, Assessing the effect of landscape change on fauna by agent-based model simulation. International Association for Landscape Ecology (IALE) 2013 European Congress, 9-12 septembre, Manchester, Royaume-Uni

Jolivet L., 2013, Modélisation des données géographiques et étude de déplacements de faune, Journées de la Recherche IGN, poster, 24-25 avril, ENSG, Marne-la-Vallée, France

Jolivet L., Cohen M., Ruas A., 2012, Modelling fauna movements with agents. 7th International Conference on Geographic Information Science (GIScience'12), session poster, 18-21 septembre, Colombus, USA

Jolivet L., 2012, Analyse des relations entre données géographiques et données localisées de faune. Séminaire du GDR MAGIS, GP Suivi des milieux, Approches méthodologiques en géomatique pour la cartographie de la Trame Verte et Bleue (TVB), 24 janvier, Paris, France

Jolivet L., Cohen M., Ruas A., 2011, Characterizing geographical space to analyze fauna movement. 25th International Cartographic Conference (ICC'11), 3-8 juillet, Paris, France

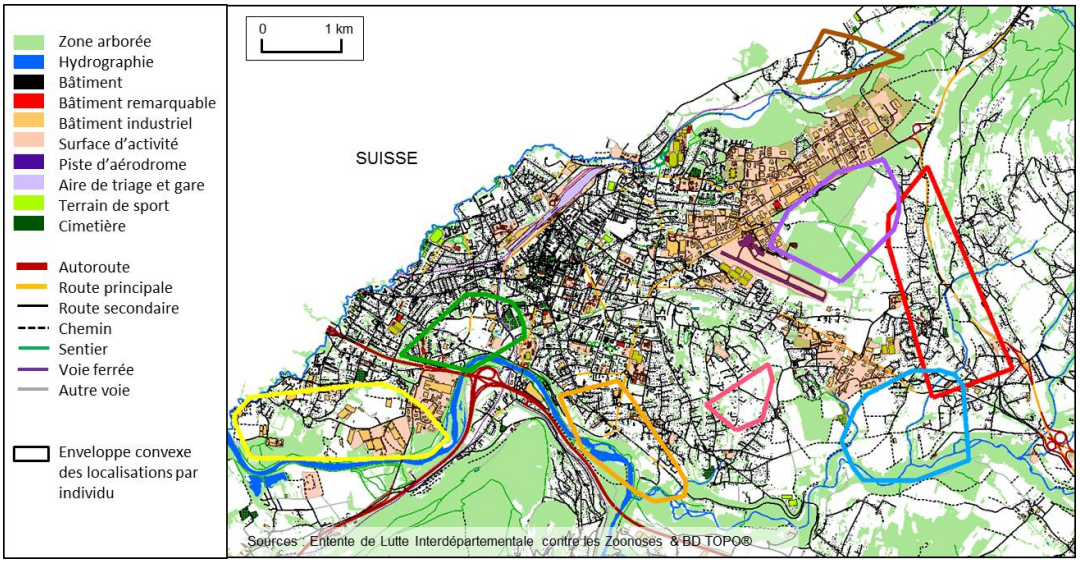
Jolivet L., 2010, Modélisation des données géographiques pour l'étude de déplacements d'animaux. Forum des doctorants de l'École Doctorale de Géographie de Paris, Thème « Le Terrain », poster, 16 avril, Paris, France

ANNEXES

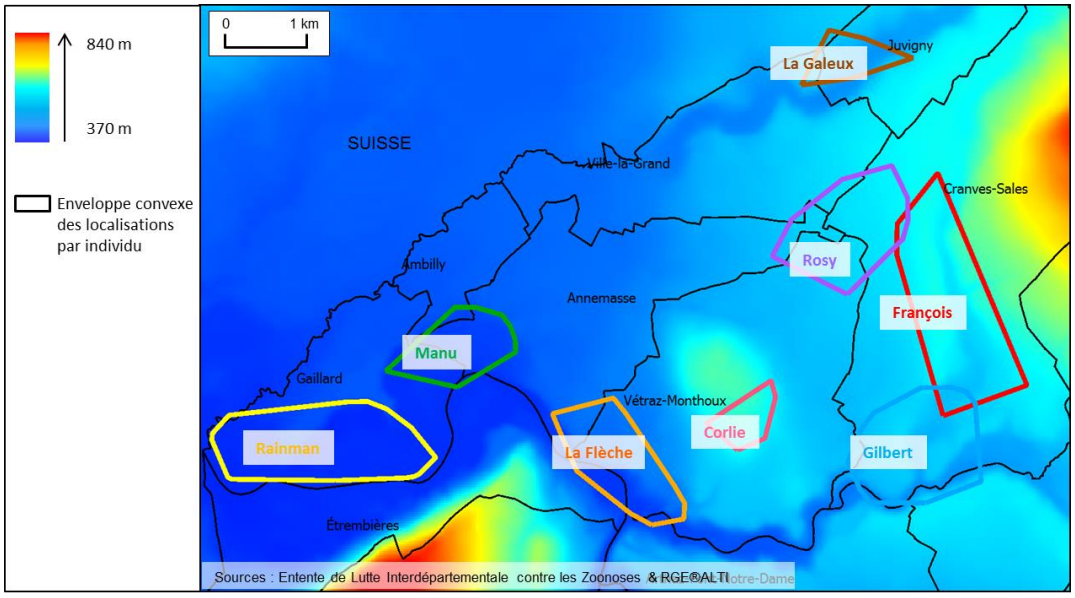
ANNEXE 1 – CARTOGRAPHIE DES SITES D'ÉTUDE ET DES SUIVIS DES ESPÈCES ANIMALES

Nous représentons les cinq sites d'étude et les suivis des trois espèces : renard, chevreuil et cerf. Les bases de données suivantes sont cartographiées : BD TOPO®, RGE®ALTI et CORINE Land Cover. Les espaces parcourus par les individus sont estimés par enveloppe convexe à partir des localisations enregistrées par VHF ou GPS. Pour les chevreuils à Aurignac, nous indiquons les lieux de début de suivis.

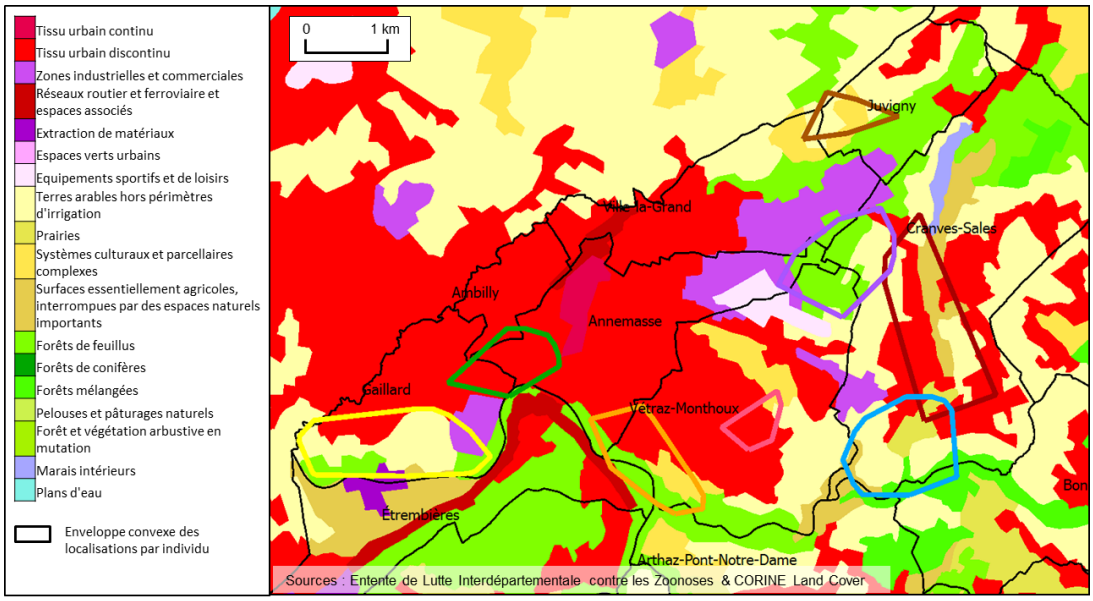
Annemasse – localisations des renards, suivis de l'ELIZ



Les données de la BD TOPO® et les enveloppes convexes des localisations des huit renards suivis.

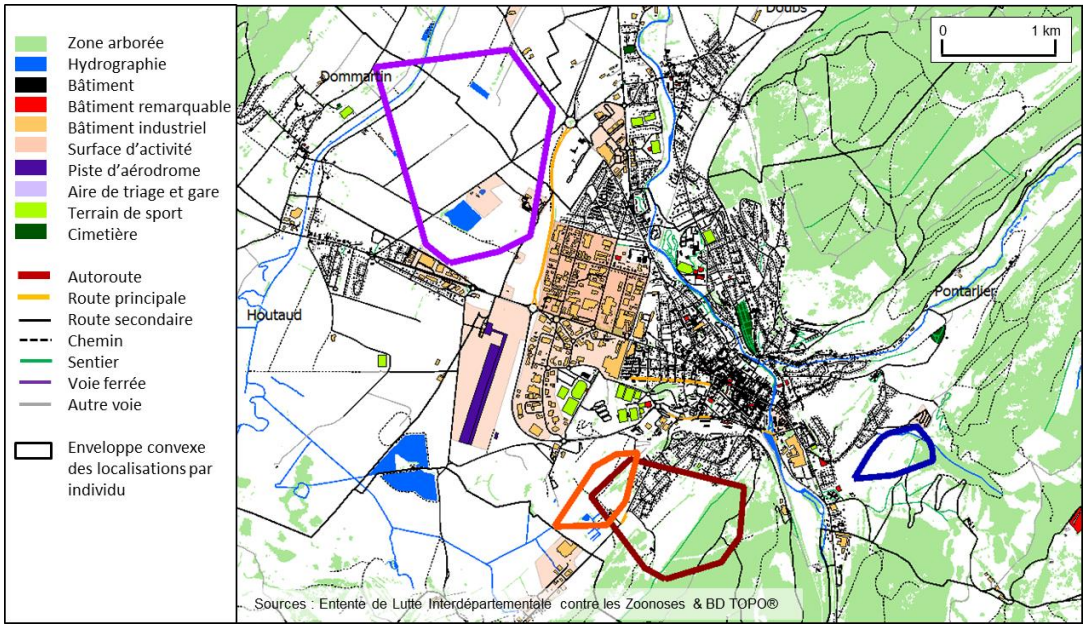


Le RGE®ALTI, les noms des huit renards suivis et les enveloppes convexes de leurs localisations.

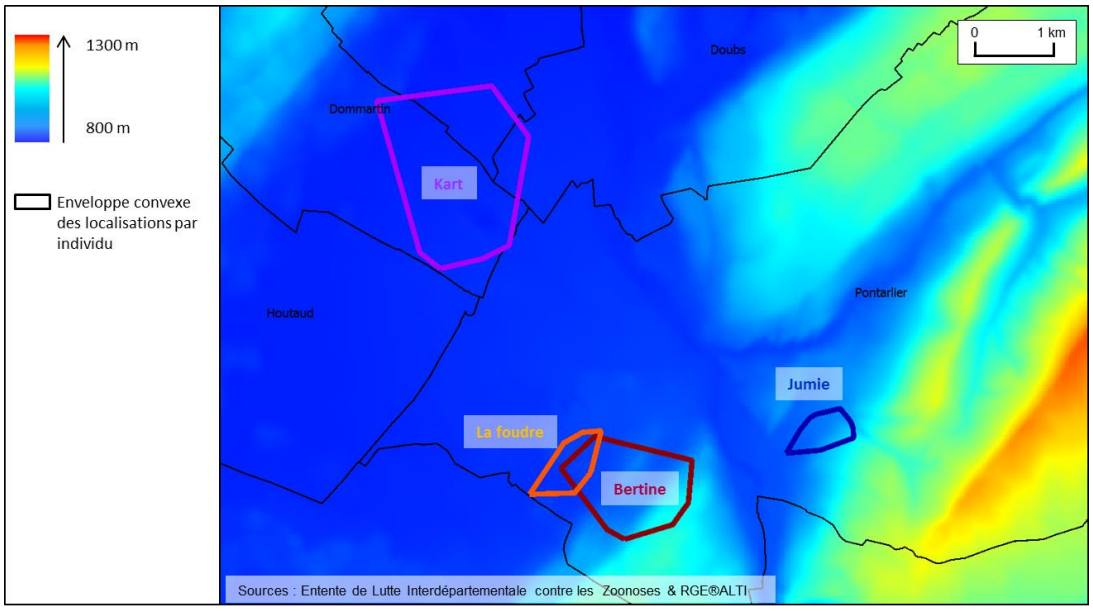


La base de données européenne CORINE Land Cover 2006 et les enveloppes convexes des localisations des huit renards suivis.

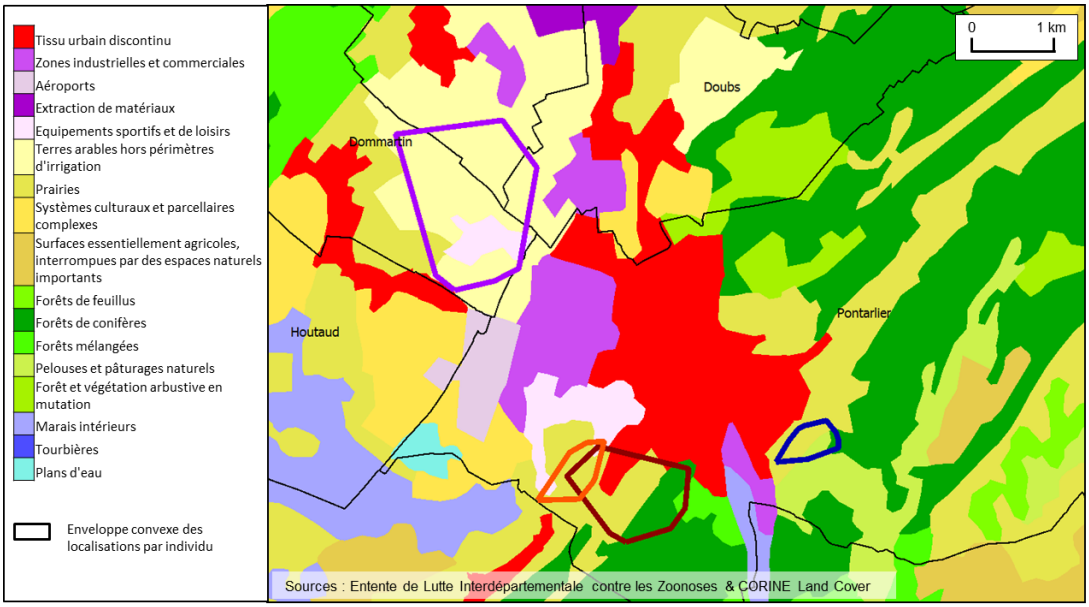
Pontarlier – localisations des renards, suivis de l'ELIZ



Les données de la BD TOPO® et les enveloppes convexes des localisations des quatre renards suivis.

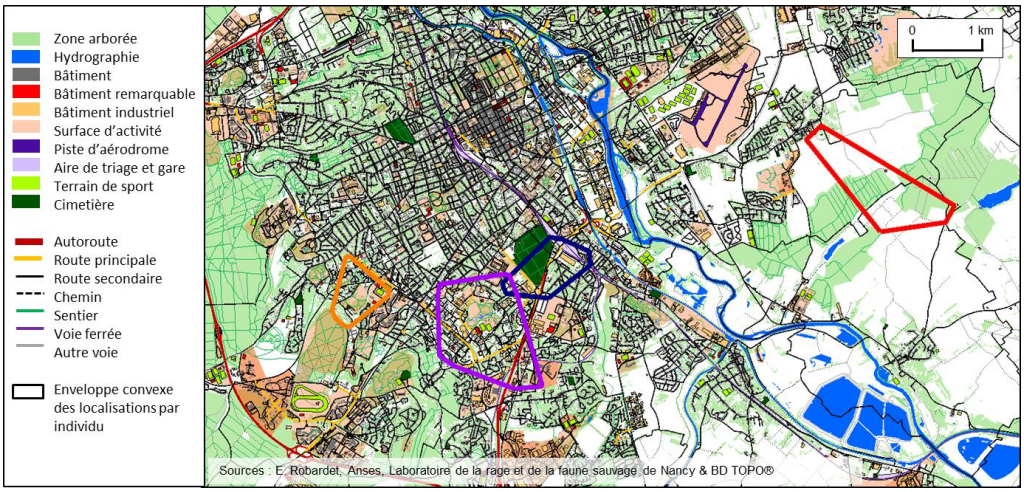


Le RGE®ALTI, les noms des quatre renards suivis et les enveloppes convexes de leurs localisations.

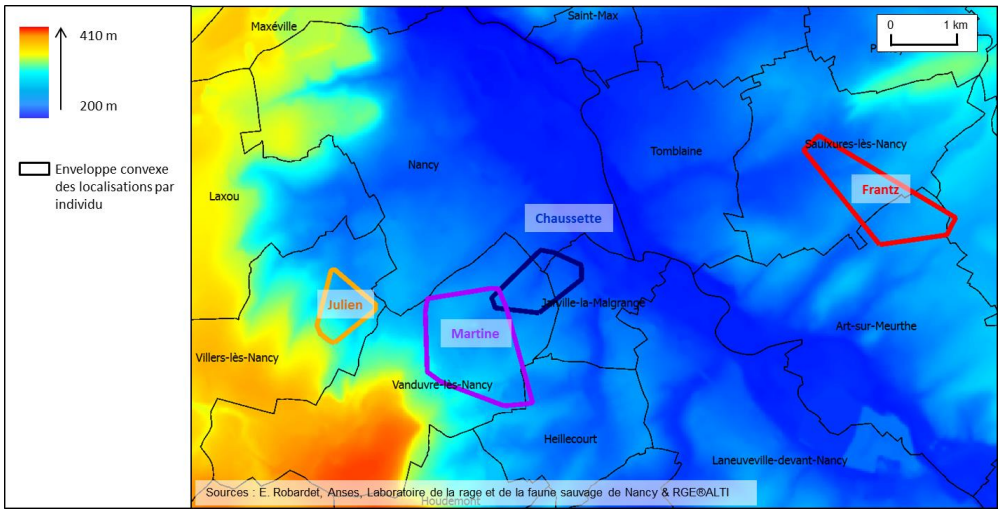


La base de données européenne CORINE Land Cover 2006 et les enveloppes convexes des localisations des quatre renards suivis.

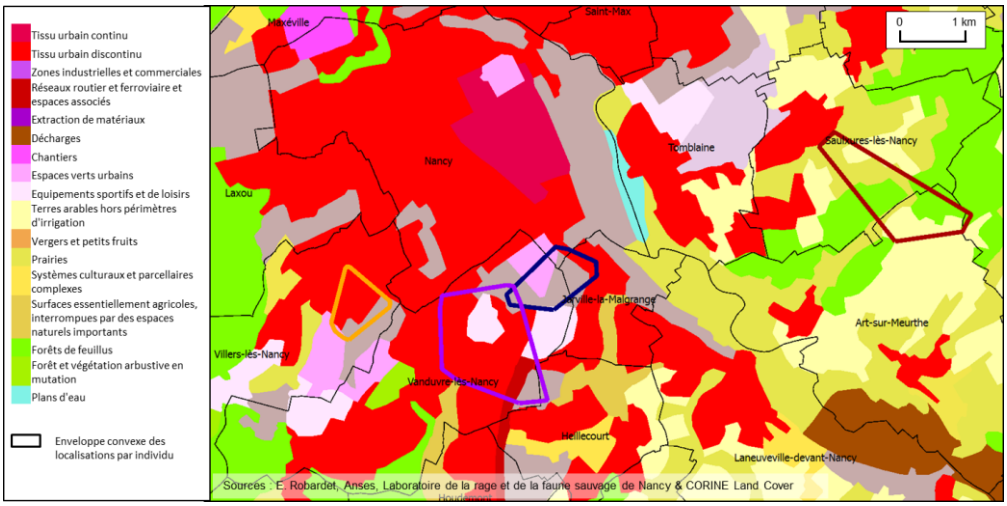
Nancy – localisations des renards, suivis de l'Anses



Les données de la BD TOPO® et les enveloppes convexes des localisations des quatre renards suivis.

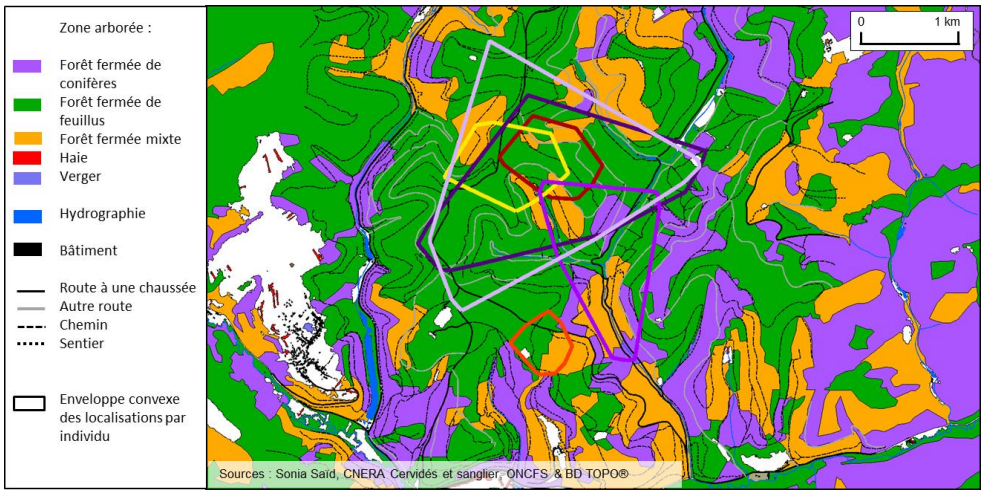


Le RGE®ALTI, les noms des quatre renards suivis et les enveloppes convexes de leurs localisations.

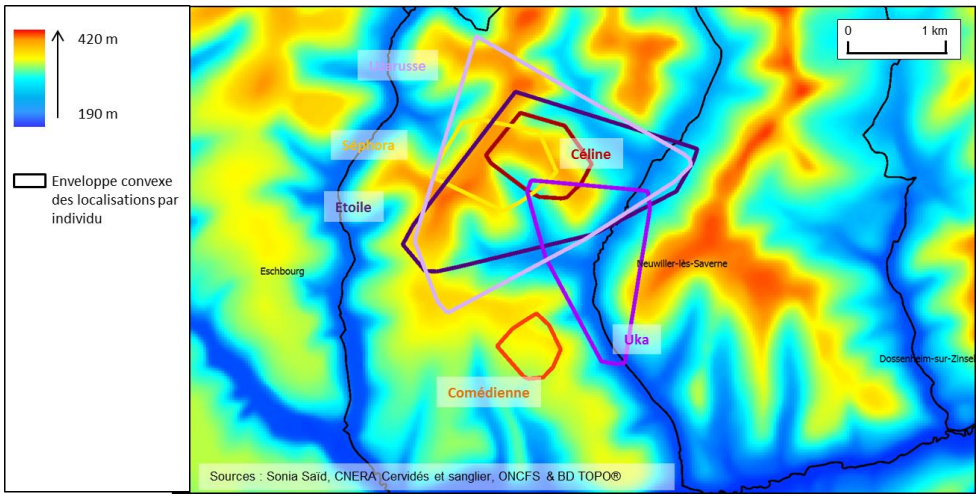


La base de données européenne CORINE Land Cover 2006 et les enveloppes convexes des localisations des quatre renards suivis.

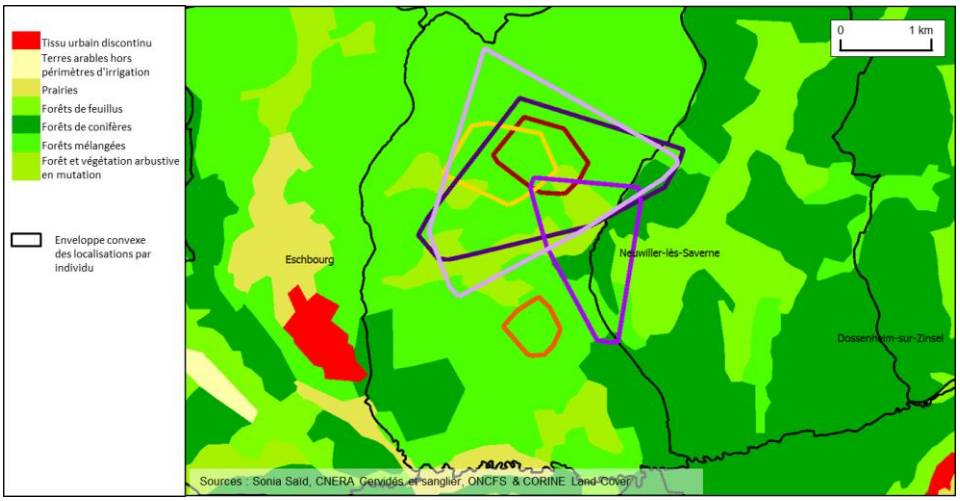
Les Vosges du Nord – localisations des chevreuils et cerfs, suivis de l'ONCFS



Les données de la BD TOPO® et les enveloppes convexes des localisations des trois chevreuils et des trois cerfs.

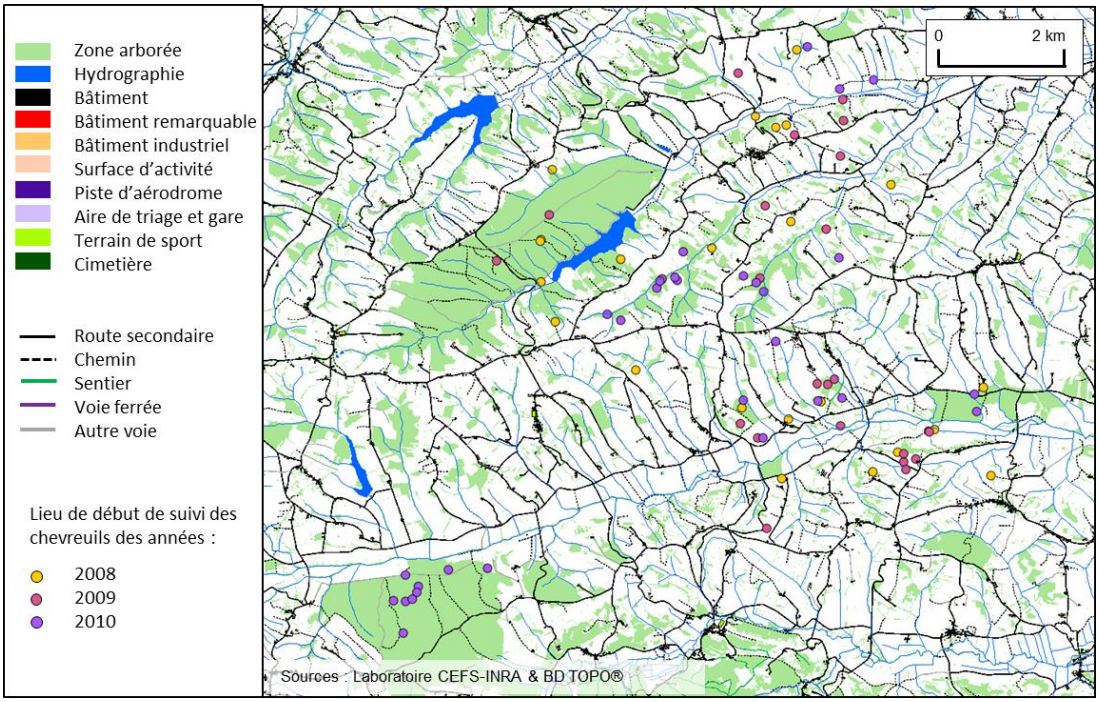


Le RGE®ALTI, les noms des trois chevreuils et trois cerfs suivis et les enveloppes convexes de leurs localisations.

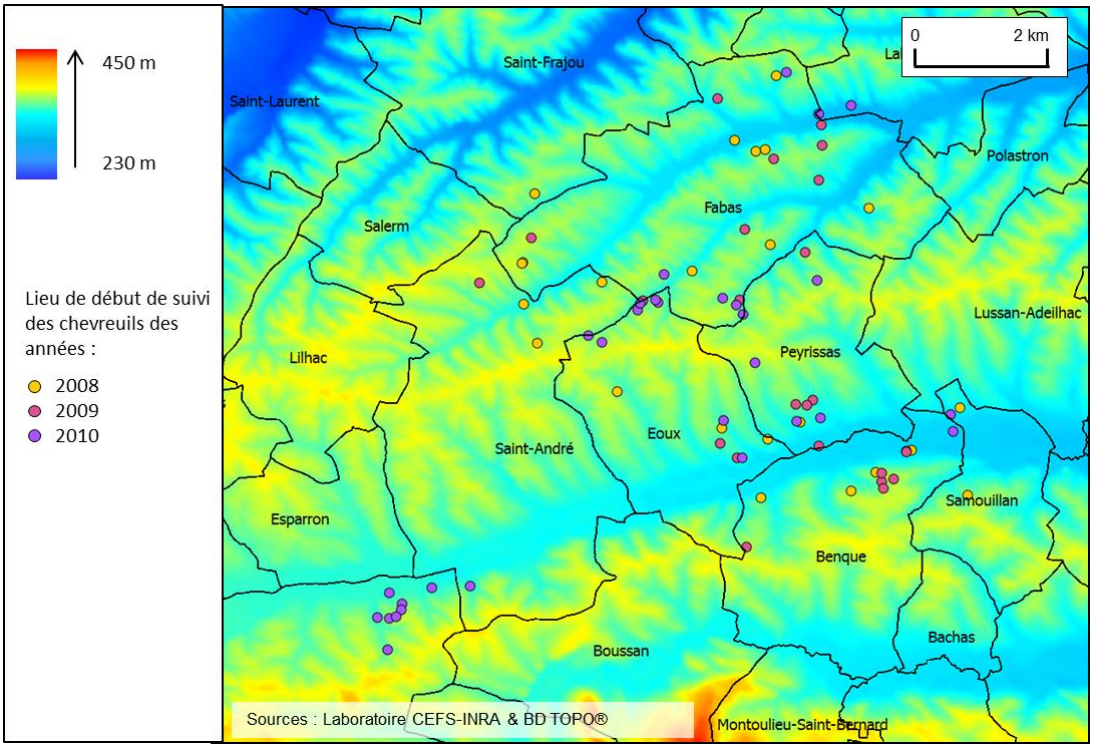


La base de données européenne CORINE Land Cover 2006 et les trois chevreuils et trois cerfs.

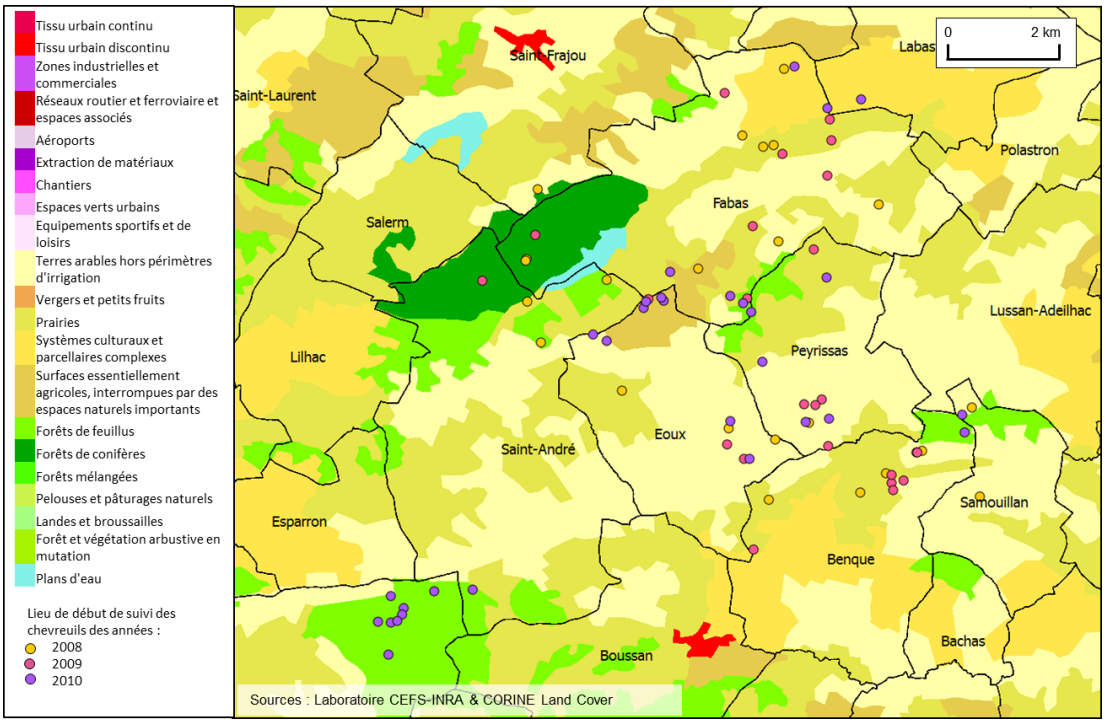
Haute-Garonne – localisations des chevreuils, suivis du CEFS (INRA)



Les données de la BD TOPO® et les localisations de début de suivis selon les années des 70 chevreuils par année.



Le RGE®ALTI et les localisations de début de suivis selon les années des 70 chevreuils par année.



La base de données européenne CORINE Land Cover 2006 et les localisations de début de suivis selon les années des 70 chevreuils par année.

ANNEXE 2 – DESCRIPTION DES ÉCHANTILLONS DE LOCALISATIONS DES ANIMAUX

Pour les renards, les classes d'âge sont : juvénile ou jeune « j » (moins d'un an), subadulte « subad » (entre 1 et 2 ans), et adultes « ad ».
Pour les chevreuils, ces classes sont juvéniles ou jeunes « j » (moins d'un an), yearling « y » (entre 1 et 2 ans), et adultes « ad ».
Pour les cerfs, jeunes « j » (moins d'un an) ou adulte (plus d'un an) « ad ».
Les femelles sont indiquées par l'abréviation « f » et les mâles par « m ».
Pour les cervidés, la description des échantillons de localisations a été fournie par les écologues. Pour les renards, les informations viennent des écologues et des rapports suivants : pour les données de l'ELIZ les rapports de Sigaud (2003), Boyer (2004), Raton (2004), et pour les données de l'Anses par Robardet (2007).

Relevés de localisations de renards effectués par l'ELIZ sur la zone d'Annemasse entre 2004 et 2006.

nom	sexe	âge	nombre de points relevés	nombre de points non nuls	nombre de jours séparés de plus de 24 h	date de début	heure de début	date de fin	heure de fin	durée du suivi en jour
Bertine	f	ad	117	84	35	20/07/2004	06:00:00	03/02/2006	14:00:00	563
Jumie	f	j	41	41	12	21/07/2004	06:00:00	03/10/2004	22:55:00	74
Kart	m	ad	25	25	14	23/07/2005	08:30:00	03/02/2006	09:00:00	195
La foudre	f	j	23	23	5	22/07/2004	06:00:00	17/08/2004	01:25:00	26

Relevés de localisations de renards effectués par l'ELIZ sur la zone de Pontarlier entre 2003 et 2005.

nom	sexe	âge	nombre de points relevés	nombre de points non nuls	nombre de jours séparés de plus de 24 h	date de début	heure de début	date de fin	heure de fin	durée du suivi en jour
Corlie	f	ad	9	9	4	22/06/2004	06:00:00	26/07/2004	23:10:00	24
François	m	non connu	17	17	12	03/05/2005	22:00:00	03/11/2005	00:30:00	184
Gilbert	m	ad	88	88	29	26/05/2003	17:40:00	01/04/2004	21:45:00	310
La flèche	m	ad	81	81	33	19/02/2004	07:00:00	26/07/2005	14:45:00	521
Le galeux	m	ad	10	10	3	18/02/2004	07:00:00	11/03/2004	22:20:00	21
Manu	m	ad	97	97	18	23/05/2003	08:30:00	14/01/2004	18:15:00	236
Rainman	m	ad	188	188	48	05/05/2003	15:00:00	18/02/2005	07:00:00	654
Rosy	f	ad	81	81	21	19/05/2003	20:45:00	17/02/2004	03:00:00	274

Relevés de localisations de renards effectués par E. Robardet, Anses, sur l'agglomération nancéenne en 2006.

nom (numéro)	sexe	âge	nombre de points relevés	nombre de points non nuls	nombre de jours séparés de plus de 24 h	date de début	heure de début	date de fin	heure de fin	durée du suivi en jour
Chaussette (1)	m	j	39	39	1	11/12/2006	17:01:20	12/12/2006	05:30:22	2
Frantz (2)	m	ad	95	95	2	31/01/2006	22:00:00	07/02/2006	23:00:00	8
Julien (3)	m	ad	153	142	1	07/08/2006	22:00:49	08/08/2006	22:00:59	2
Martine (4)	f	ad	399	399	2	22/05/2006	22:01:23	30/05/2006	22:00:42	10

Description des données de localisations de chevreuils. Relevés menés par l'ONCFS dans la RNCFS de la Petite Pierre, en 2008.

nom	sexe	âge	nombre de points relevés	nombre de points non nuls	nombre de jours séparés de plus de 24 h	date de début	heure de début	date de fin	heure de fin	durée du suivi en jour
Céline	f	ad	1265	1265	5	14/04/2008	00:01	27/10/2008	23:55	196
Comédienne	f	ad	1226	1226	5	14/04/2008	00:01	27/10/2008	23:55	196
Séphora	f	ad	1509	1509	6	17/03/2008	00:00	27/10/2008	23:56	224

Description des données de localisations de cerfs. Relevés menés par l'ONCFS dans la RNCFS de la Petite Pierre, en 2008.

nom	sexe	âge	nombre de points relevés	nombre de points non nuls	nombre de jours séparés de plus de 24 h	date de début	heure de début	date de fin	heure de fin	durée du suivi en jour
Étoile	f	ad	670	670	3	14/04/2008	00:00	27/10/2008	23:55	196
Uka	f	ad	672	507	4	21/06/2008	00:00:56	27/09/2008	23:45:56	98
Uzarusse	f	ad	1364	1364	5	14/04/2008	00:01	27/10/2008	23:55	196

Relevés menés par l'INRA dans le canton d'Aurignac sur les chevreuils, entre 2008 et 2010.

en bleu : les individus suivis sur plusieurs années

identifiant	sexe	âge	nombre de points relevés	nombre de points non nuls	nombre de jours séparés de plus de 24 h	date de début	heure de début	date de fin	heure de fin	durée du suivi en jour
378	m	j	4285	3409	363	06/12/2007	18:02:17	04/12/2008	06:01:20	**699**
382	m	y	3571	3107	272	07/12/2007	18:01:23	05/09/2008	06:01:49	272
384	f	j	598	483	79	06/12/2007	18:01:18	24/02/2008	00:00:49	79
386	f	j	2642	2485	241	07/12/2007	00:01:06	03/08/2008	21:00:48	241
390	f	ad	4744	4293	336	10/01/2008	18:01:59	11/12/2008	12:01:57	336
392	m	j	4714	3942	329	17/01/2008	18:01:38	12/12/2008	12:01:43	329
394	f	ad	4720	4456	330	17/01/2008	18:01:35	12/12/2008	12:01:39	330
396	f	j	4692	4337	323	24/01/2008	18:00:49	12/12/2008	12:00:52	323
402	f	ad	4742	4504	335	11/01/2008	06:02:05	11/12/2008	12:00:59	335
406	f	j	4744	4457	336	10/01/2008	18:01:36	11/12/2008	12:01:18	336
412	m	j	4743	4545	336	11/01/2008	00:01:21	11/12/2008	12:01:20	336
414	f	ad	4687	4421	322	25/01/2008	00:01:07	11/12/2008	12:01:21	322
416	m	j	4837	4377	394	31/01/2008	18:01:30	28/02/2009	18:00:59	**699**
418	f	ad	4524	4106	316	31/01/2008	18:01:20	12/12/2008	12:00:50	316
420	f	j	4837	4428	394	31/01/2008	18:01:19	28/02/2009	18:01:22	394
424	f	ad	4519	4048	315	21/02/2008	00:01:39	11/12/2008	12:01:19	315
426	f	y	4524	4209	316	31/01/2008	18:01:37	12/12/2008	12:00:59	316
432	f	ad	4496	4254	309	07/02/2008	18:00:58	12/12/2008	12:00:59	309
434	m	j	4744	4456	336	07/02/2008	18:02:27	08/01/2009	12:01:18	336
436	m	j	4744	4588	336	07/02/2008	18:01:36	08/01/2009	12:01:19	336

438	f	j	4742	4547	335	08/02/2008	06:00:53	08/01/2009	12:00:49	335
442	m	j	1340	1276	125	10/02/2008	06:01:39	11/06/2008	18:01:19	125
444	f	j	4800	4554	350	07/02/2008	18:01:38	22/01/2009	06:01:10	**680**
446	f	j	3128	2795	193	08/02/2008	06:01:34	19/08/2008	16:00:17	193
378_09	m	y	4760	3679	336	04/12/2008	18:01:38	05/11/2009	18:01:16	**699**
444_09	f	y	5140	4763	330	22/01/2009	18:01:18	18/12/2009	12:01:50	**680**
470	f	ad	2138	1929	129	15/01/2009	18:01:20	25/05/2009	00:00:58	129
472	f	y	5140	4751	330	22/01/2009	18:00:57	18/12/2009	12:01:20	330
474	m	ad	5372	4958	323	29/01/2009	18:02:29	18/12/2009	12:01:20	323
476	f	j	5372	5141	323	29/01/2009	18:01:39	18/12/2009	12:00:59	323
480	m	j	5372	4915	323	29/01/2009	18:01:39	18/12/2009	12:01:08	323
484	m	y	5373	4860	323	29/01/2009	18:01:39	18/12/2009	18:02:28	**649**
486	m	j	5372	4830	323	29/01/2009	18:01:19	18/12/2009	12:02:29	**471**
488	m	ad	5355	4072	318	29/01/2009	18:02:04	14/12/2009	00:01:18	318
494	m	j	5164	4798	316	05/02/2009	18:01:20	18/12/2009	12:00:59	316
496	m	j	1629	1525	86	05/02/2009	18:01:14	02/05/2009	07:01:10	86
500	f	j	4740	4021	335	04/12/2008	18:01:11	04/11/2009	12:01:41	335
501	f	j	5084	4584	316	05/02/2009	18:01:19	18/12/2009	12:01:19	316
502	m	ad	3402	3224	180	05/02/2009	18:01:48	05/08/2009	06:41:13	180
504	f	j	5164	4508	316	05/02/2009	18:01:52	18/12/2009	12:02:29	316
510	f	j	5106	4805	336	26/02/2009	16:01:06	28/01/2010	18:01:06	336
512	m	ad	2145	2080	106	26/02/2009	15:00:50	12/06/2009	13:00:56	106
516	m	j	4940	4538	295	26/02/2009	20:01:39	18/12/2009	12:01:19	**599**
520	m	j	1214	1137	57	26/02/2009	16:01:04	24/04/2009	07:01:03	57
522	m	y	4941	4594	295	26/02/2009	16:00:49	18/12/2009	12:01:17	295
532	f	j	4503	4030	255	26/02/2009	15:01:39	19/11/2009	01:01:18	255
542	f	j	5372	4849	323	29/01/2009	18:01:53	18/12/2009	12:01:07	323
f526	f	ad	5304	4645	324	2010	18:01:38	2010	09:52:12	324
f544	f	ad	5212	4858	333	2010	18:02:28	2010	12:01:20	333
f558	f	ad	1590	1316	112	2010	18:01:17	2010	00:00:27	112
f572	f	ad	5464	5280	326	2010	18:01:19	2010	12:01:14	326
f582	f	ad	5436	5119	319	2010	18:02:29	2010	12:02:29	319
fj530	f	j	3348	3192	203	2010	18:01:48	2010	18:01:38	203
fj536	f	j	5624	5476	336	2010	18:01:36	2010	12:00:58	336
fj538	f	j	5624	5079	336	2010	18:01:38	2010	12:00:49	336
fj546	f	j	2312	2306	173	14/01/2010	18:00:53	06/07/2010	12:00:47	173
fj552	f	j	2621	2593	250	14/01/2010	18:01:53	21/09/2010	18:03:11	250
fj566	f	j	1327	1324	87	21/01/2010	18:01:12	18/04/2010	21:00:24	87
fj568	f	j	1712	1711	103	21/01/2010	18:00:44	04/05/2010	22:00:57	103
fj572	f	j	2864	2861	311	04/02/2010	18:00:44	12/12/2010	12:00:54	311
fj578	f	j	2715	2697	296	28/01/2010	18:00:56	29/11/2010	18:01:43	296
fy507	f	y	884	835	89	2010	18:01:19	2010	835	89
fy588	f	y	2189	1997	137	2010	18:01:39	2010	1997	137
m416	m	ad	5380	4831	305	2010	18:01:38	2010	12:01:16	**699**
m43	m	ad	5408	5133	312	2010	18:01:38	2010	12:00:59	312

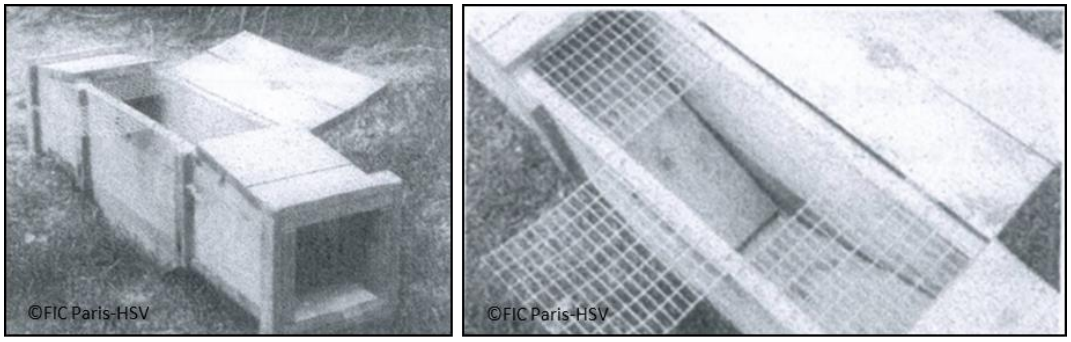
m484	m	ad	5464	5242	326	2010	18:01:39	2010	12:01:20	**649**
m528	m	ad	5520	5381	340	2010	18:01:00	2010	12:01:06	340
m532	m	ad	5504	4900	336	2010	18:01:48	2010	12:01:19	336
m540	m	ad	5495	5109	334	2010	00:01:19	2010	12:01:15	334
m574	m	ad	5436	4371	319	2010	18:01:38	2010	12:01:39	319
m586	m	ad	5408	5288	312	2010	18:01:22	2010	12:00:59	312
mj550	m	ad	2381	2299	195	14/01/2010	18:00:54	28/07/2010	18:01:43	195
mj556	m	j	1154	1149	86	14/01/2010	18:02:52	10/04/2010	12:01:17	86
mj560	m	j	2314	2011	168	2010	18:01:38	2010	00:01:15	168
my486	m	y	2234	2125	148	2010	18:01:39	2010	00:00:59	**471**
my516	m	y	5380	5163	305	2010	18:01:41	2010	12:00:54	**599**
my554	m	y	3863	3000	225	2010	18:01:15	2010	01:02:19	225

ANNEXE 3 – LES MÉTHODES DE CAPTURE DES ANIMAUX POUR LES SUIVIS

Plusieurs méthodes de capture des animaux sont agréées par la loi. Nous listons celles utilisées pour les suivis dans nos cas d'étude. La pose de l'ensemble de ces pièges nécessite des visites plusieurs fois par jour afin de récupérer l'animal capturé, l'équiper d'un collier et le relâcher.

- Cage-piège

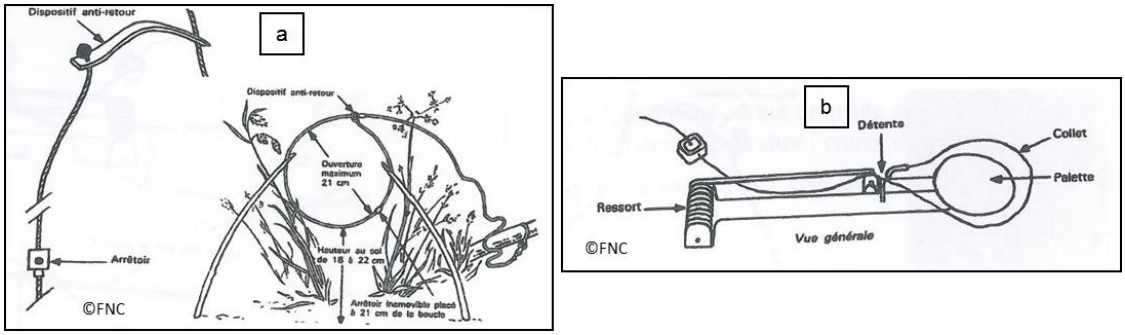
Des appâts sont posés à l'intérieur de la cage-piège qui se referme après l'entrée de l'animal. En fonction de la taille de l'animal (renard, chevreuil ou cerf), les cages sont plus ou moins grandes.



La taille des cages-pièges dépend des espèces ciblées : photographies d'une « boîte à fauve » par exemple pour des renards (taille de la boîte de moins de 2 m). Source : Fédération Interdépartementale des Chasseurs de Paris-HSV (FIC, 2011).

- Collet avec arrêtoir et piège à lacet de pattes

Ces pièges sont utilisés pour les renards. Le collet avec arrêtoir permet de capturer l'animal par le cou sans l'étrangler. Le piège à lacet de pattes enserre une des pattes pour le stopper.



a) Le collet avec arrêtoir est placé entre 18 et 22 cm du sol. Le diamètre est d'environ 20 cm et un dispositif anti-retour empêche le collet de se refermer complètement. b) Le piège à lacet de pattes est placé au sol et l'animal est stoppé par la palette et le lacet (FIC, 2011).

- Filet tombant

Les filets tombants sont entre autres utilisés pour les chevreuils. Ils sont positionnés dans une zone occupée par les animaux. Des battues sont organisées afin de diriger les animaux vers les filets. Les individus sont ensuite placés dans une boîte pour procéder à des prélèvements et la pose de colliers GPS.

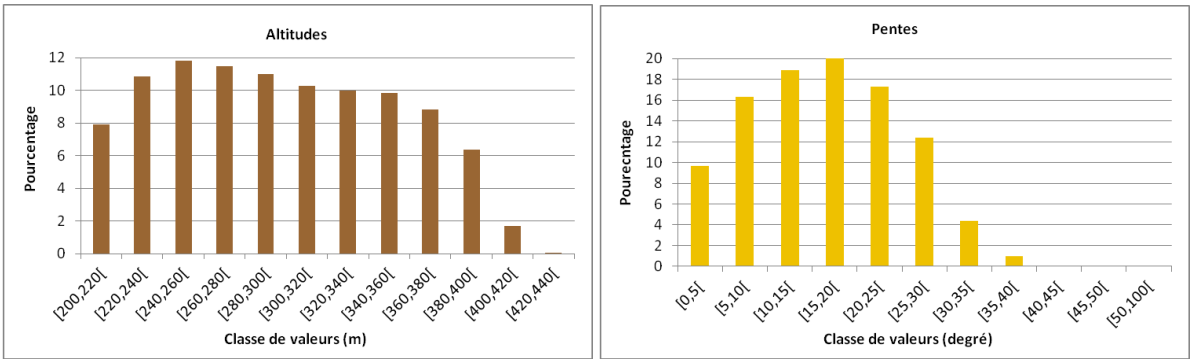
Filets tombants installés sur une culture et traversant les haies, ici sur le site d'étude du CEFS (INRA) occupé par des chevreuils.

La photographie d'un collier GPS posé sur les renards dans le cas d'étude de l'agglomération de Nancy par Robardet (2007).

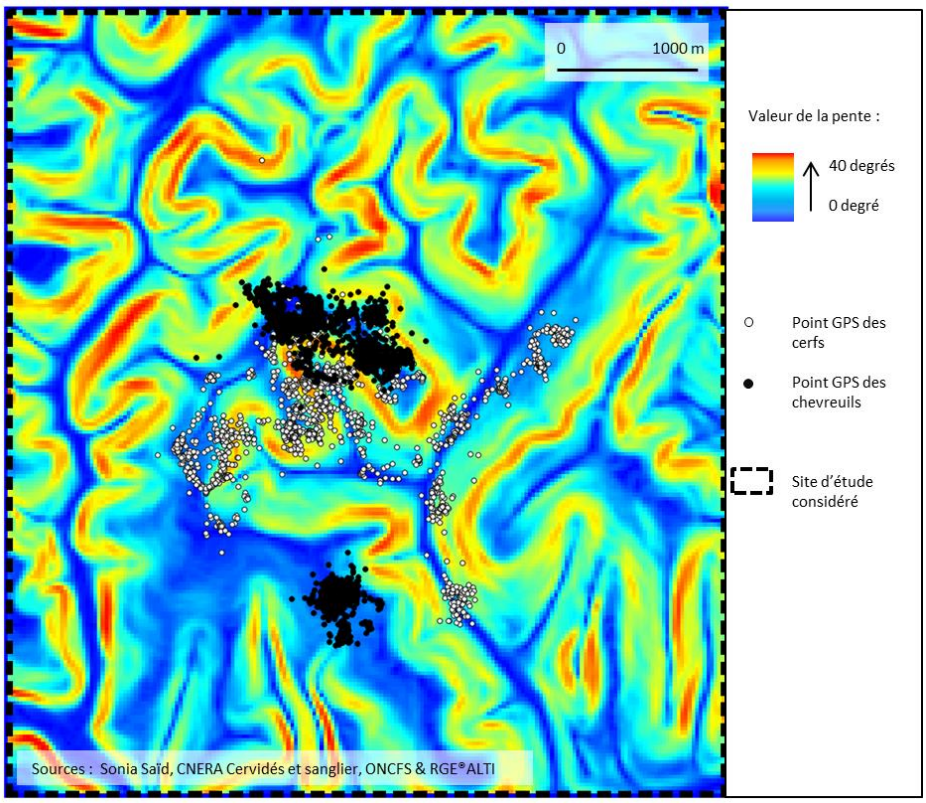
Modèle 3300SL par Lotek® pesant environ 200 grammes et utilisé pour les mammifères de taille moyenne comme les renards.

ANNEXE 4 – LES ALTITUDES ET LES PENTES SUR LE SITE D'ÉTUDE DES VOSGES DU NORD

Nous étudions le relief dans les sites d'étude. Pour les chevreuils et les cerfs suivis dans la RNCFS de la Petite Pierre dans les Vosges du Nord, la distribution des altitudes et des pentes sont représentées sur les graphes ci-dessous. Nous avons choisi de restreindre la zone aux coodonnées limites de l'ensemble de localisations minorées ou majorées de 1 km, comme sur la carte présentée.



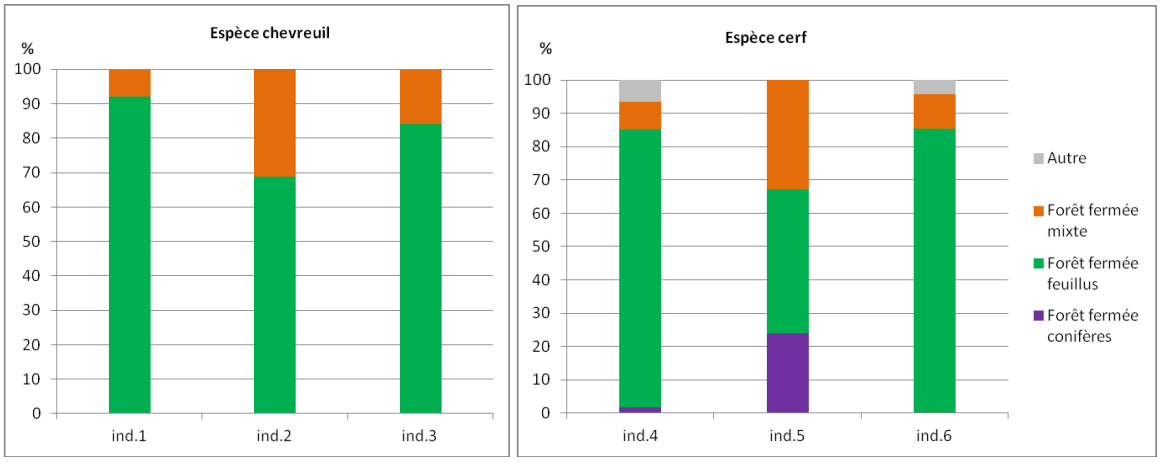
Graphes de la répartition des valeurs d'altitudes et de pentes sur le site d'étude des cervidés de la RNCFS.



Carte des pentes du site d'étude des Vosges du Nord considéré pour les graphes des altitudes et des pentes. Le site correspond au rectangle englobant de l'ensemble des localisations des cerfs et des chevreuils, majoré d'une zone tampon de 1 km.

ANNEXE 5 – LES PEUPLEMENTS FORESTIERS CORRESPONDANT AUX LOCALISATIONS PAR CHEVREUIL ET PAR CERF DANS LES VOSGES DU NORD

L'analyse des relations d'inclusion des localisations enregistrées dans les types de peuplement forestier est représenté pour les trois chevreuils et les trois cerfs suivis dans la RCNFS de La Petite Piette (Vosges du nord) par l'ONCFS. Les graphes distinguent les peuplements de feuillus, les peuplements de conifères et les peuplements mixtes de feuillus et de conifères.



Les poucentages du nombre de localisations situées dans les types de peuplement forestier par individu des deux espèces cerf et chevreuil sur le site d'étude des Vosges, à partir des localisations GPS (source : Sonia Saïd, CNERA Cervidés et sanglier, ONCFS) et de la description du couvert arboré de la BD TOPO®.

ANNEXE 6 – LES DISTANCES MINIMALES DES LOCALISATIONS AUX VOIES DE COMMUNICATION SELON LEUR TYPE – CAS DES CERVIDÉS DANS LES VOSGES DU NORD

Les calculs des distances minimales entre les localisations et les voies de communication sont détaillés par individu afin d'illustrer les variations observées pour le chevreuil et pour le cerf.

Les distances minimales moyennes en mètre des localisations GPS aux différents types de voies de communication par individu, pour les cervidés de la RNCFS la Petite Pierre.

espèce	individu	sentier	chemin	route empierrée	route à 1 chaussée	indifférencié
chevreuil	ind.1	866	74	80	523	41
	ind.2	279	44	686	189	43
	ind.3	725	90	178	129	49
cerf	ind.1	593	56	99	295	30
	ind.2	422	67	79	155	19
	ind.3	709	54	98	336	34
chevreuil	*moyenne*	623	70	315	281	44
cerf	*moyenne*	575	59	92	262	28

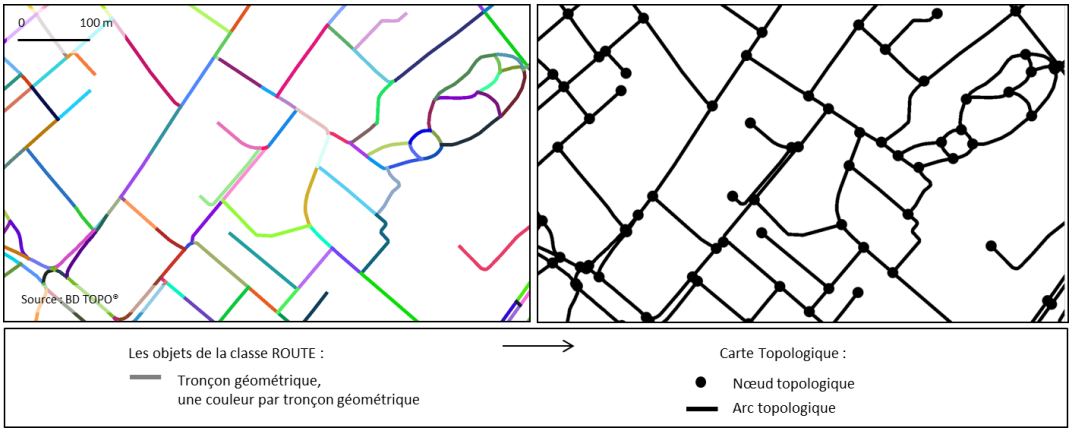
Les pourcentages de localisations situées à moins de 20 m et à moins de 50 m d'une voie de communication. Il s'agit en fait en quasi-totalité de voies praticables par des véhicules : des chemins qui sont plus larges que les sentiers, des routes non goudronnées (empierrée) et des routes forestières à 1 chaussée.

espèce	individu	situées à moins de 20 m	situées à moins de 50 m
chevreuil	ind.1	23	62
	ind.2	23	68
	ind.3	22	53
cerf	ind.1	38	89
	ind.2	57	98
	ind.3	39	75
chevreuil	*moyenne*	23	61
cerf	*moyenne*	44	87

		% des localisations situées à moins de 20 m				**% des localisations situées à moins de 50 m**			
espèce	**individu**	**sentier**	**chemin**	**route empierrée**	**route à 1 chaussée**	**sentier**	**chemin**	**route empierrée**	**route à 1 chaussée**
chevreuil	ind.1	0	17	6	0	0	36	27	0
	ind.2	0	22	0	1	3	65	0	1
	ind.3	0	8	1	13	0	26	3	25
cerf	ind.1	0	25	10	6	1	61	30	14
	ind.2	5	27	13	13	11	47	32	34
	ind.3	0	26	7	8	1	53	26	14
chevreuil	*moyenne*	0	16	2	5	1	42	10	9
cerf	*moyenne*	2	26	10	9	4	54	29	20

ANNEXE 7 – ÉTUDE DES TRAVERSÉES DES VOIES PAR LA CARTE TOPOLOGIQUE

Pour estimer le nombre de traversée par les animaux, la carte topologique correspondant au réseau des voies de communication est construite. Le processus de création est celui de la construction d'un graphe planaire constitué de 3 types d'entités d'emprise géométrique différente : les nœuds, les arcs et les faces. Grâce à la carte topologique, nous pouvons calculer le nombre minimal des traversées nécessaires des voies entre les positions successives.

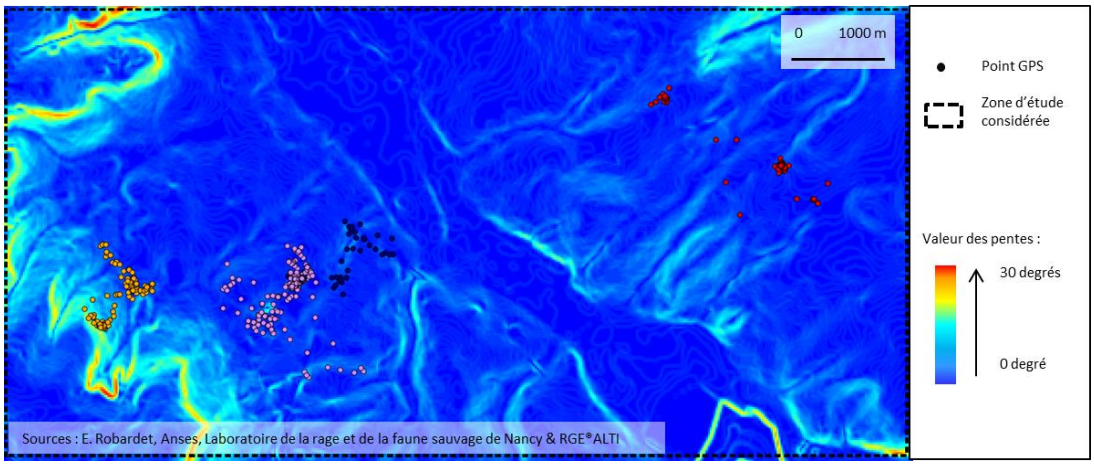


Processus de construction d'une carte topologique à partir des données sur les voies de communication de la BD TOPO®. Plusieurs tronçons de la classe ROUTE peut correspondre à un seul arc topologique, et un seul tronçon peut être divisé en plusieurs arcs.

Carte topologique correspond au rectangle englobant les localisations enregistrées d'un renard pendant 24 h dans l'agglomération de Nancy. Les nœuds et les arcs sont symbolisés en noir et chaque face possède une couleur distincte aléatoire. La trace GPS du renard est superposée à 22 faces et elle croise 21 arcs.

ANNEXE 8 – LES ALTITUDES ET LES PENTES POUR LES CAS D'ÉTUDE SUR LES RENARDS

La carte suivante représente les pentes sur l'agglomération de Nancy et les localisations des 4 renards suivis par GPS (Robardet, 2007). Sur l'ensemble de ce site, les altitudes sont comprises entre 200 et 410 m, et les pentes entre 0 et 30 degrés de dénivelé. Les localisations des renards sont sur des altitudes comprises entre 235 et 310 m et sur des pentes inférieures à 10 degrés.



Pentes du site d'étude autour de Nancy et localisations GPS des 4 renards (une couleur par individu).

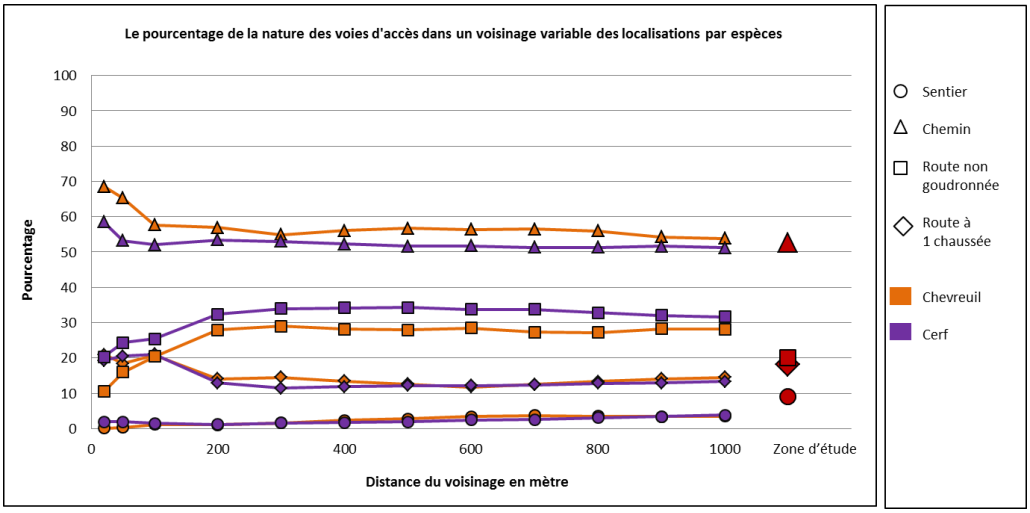
Nous détaillons dans le tableau suivant, les valeurs moyennes des altitudes et de pentes pour les trois cas d'étude sur les renards : dans l'ensemble des sites d'étude, dans les espaces parcourus estimés par enveloppe convexe et pour les localisations.

Étude des altitudes et des pentes pour les 3 cas d'étude sur les renards en milieu périurbain.

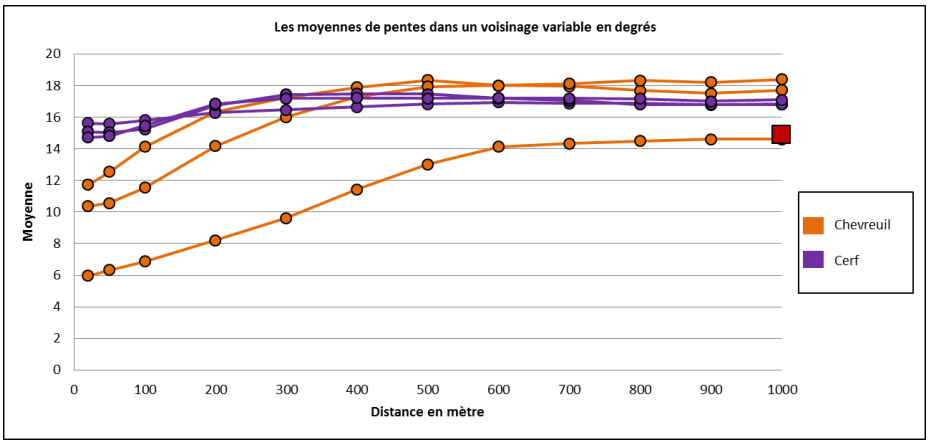
Nom du site	Entité considérée	**altitude**		**pente**	
Annemasse	site d'étude	478		5,6	
		localisations	enveloppe convexe	localisations	enveloppe convexe
	individu 1	529	540	8,3	7,4
	individu 2	510	540	7,1	7,2
	individu 3	487	489	7,0	6,9
	individu 4	427	438	9,9	6,4
	individu 5	485	485	6,7	6,0
	individu 6	416	411	3,9	3,1
	individu 7	403	402	4,6	2,9
	individu 8	513	506	2,5	2,5
Pontarlier	site d'étude	866		6,1	
		localisations	enveloppe convexe	localisations	enveloppe convexe
	individu 1	863	867	8,9	8,4
	individu 2	883	878	10,5	9,7
	individu 3	829	827	2,0	2,5
	individu 4	816	814	1,9	1,7
Nancy	site d'étude	246		4,1	
		localisations	enveloppe convexe	localisations	enveloppe convexe
	individu 1	219	223	2,9	2,7
	individu 2	237	237	2,9	2,7
	individu 3	266	255	6,0	5,4
	individu 4	232	245	3,2	3,6

ANNEXE 9 – EFFET DE LA DISTANCE DU VOISINAGE CONSIDÉRÉE ET COMPARAISON ENTRE L'ESPACE AUTOUR DES LOCALISATIONS ET L'ESPACE DANS LE DOMAINE VITAL ESTIMÉ

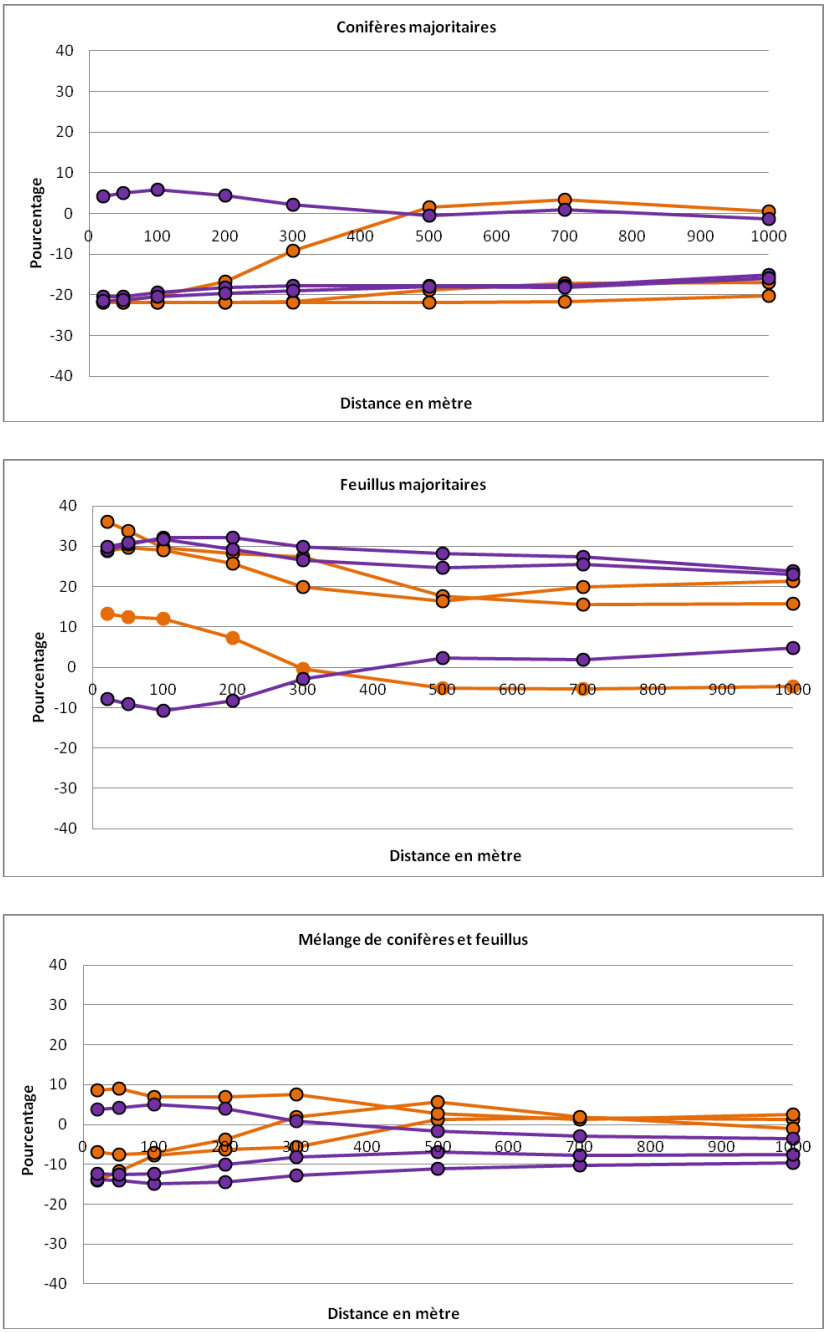
Les éléments du paysage sont analysés autour des localisations des animaux. Nous détaillons la répartition des types des voies de communication puis la moyenne des pentes dans le cas d'étude des cervidés suivis par l'ONCFS dans la RNCFS de La Petite Pierre. Nous représentons ensuite la proportion en surface des peuplements forestiers avec celle du site d'étude. Les pourcentages ou les différences de pourcentages sont représentés en fonction du rayon du voisinage considéré.



Évolution de la répartition des types des voies de communication autour des localisations selon le rayon considéré de ce voisinage.



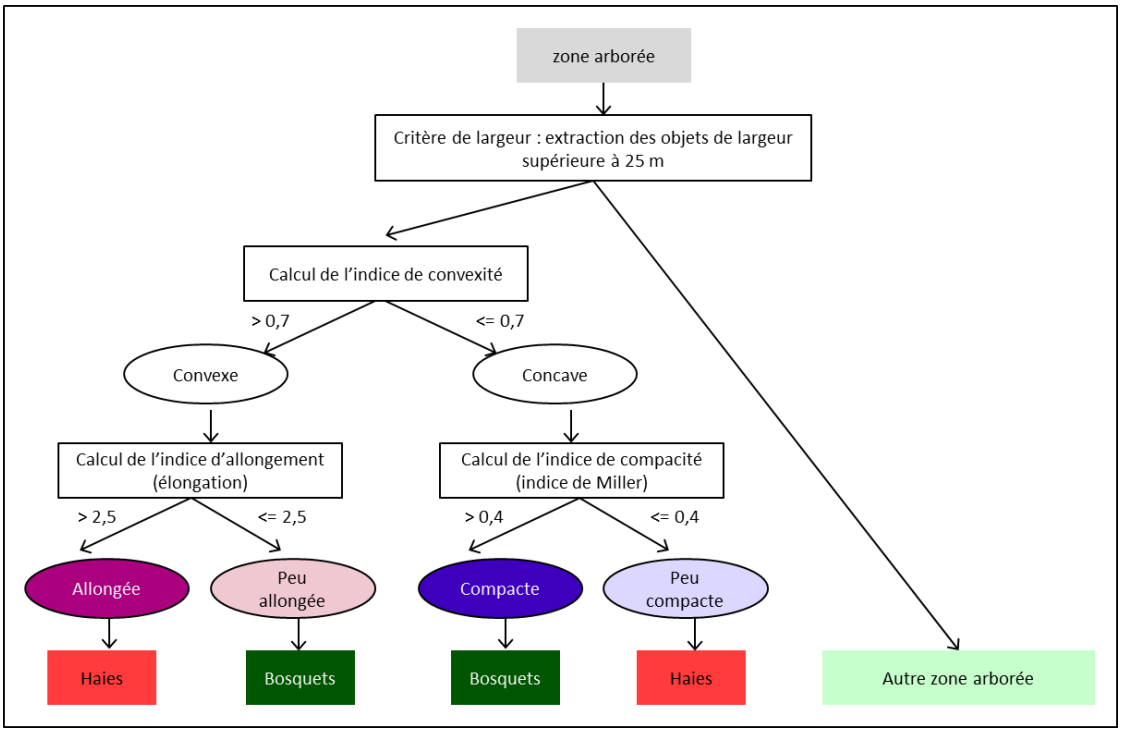
Moyenne des pentes autour de l'ensemble des localisations par individu, en fonction de la distance du voisinage considérée.



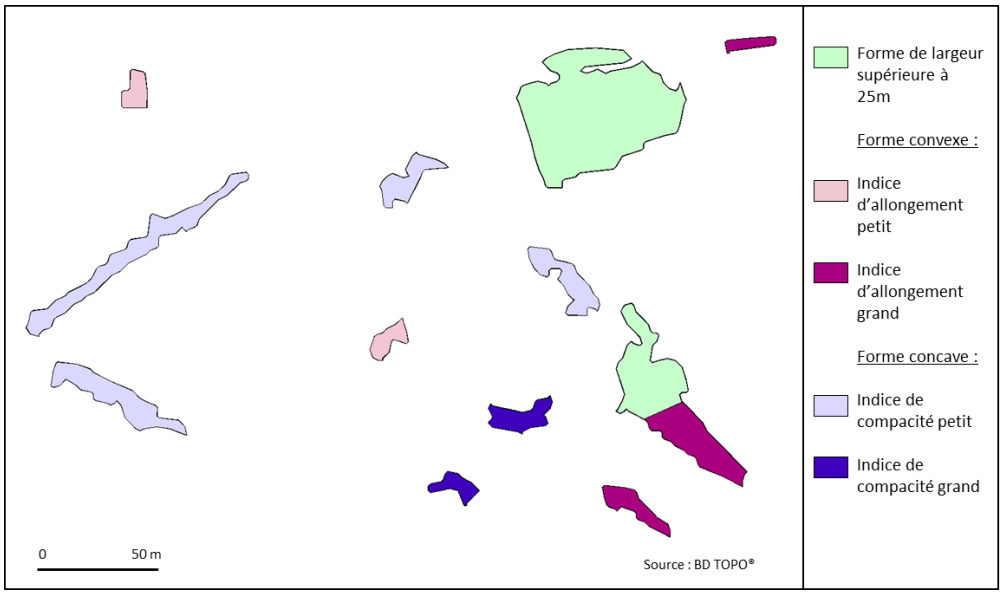
Les différences de composition dans le voisinage des localisations en fonction du rayon considéré de ce voisinage par individu, selon les types de peuplement forestiers principaux décrits dans la BD TOPO®.

ANNEXE 10 – EXTRACTION DES HAIES ET DES BOSQUETS

L'algorithme d'extraction de caractérisation des structures linéaires est décrit dans Touya *et al.* (2010). Les éléments extraits correspondent à des haies, à des bosquets ou à d'autres zones arborées. Nous détaillons les étapes principales en les décrivant par un schéma et en les illustrant par des cartes.

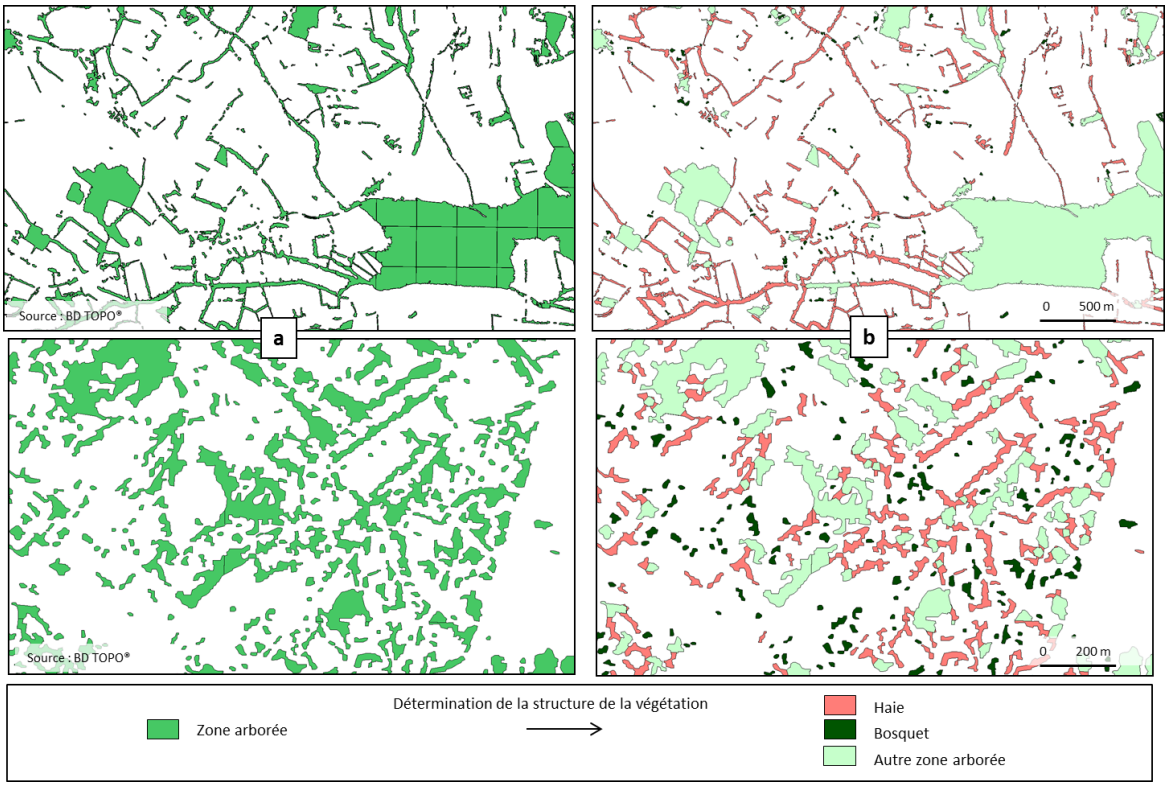


Processus d'extraction des haies, d'après Touya *et al.* (2010)



Distinction à partir des zones arborées de la BD TOPO® des objets de largeur supérieure à 25 m. La forme convexe ou concave de ces objets est caractérisée. Les haies sont les objets correspondant à un grand allongement ou à une petite compacité. Les bosquets correspondent à un petit allongement ou à une compacité élevée.

Nous montrons des extraits sur deux sites correspondant à des milieux différents : la zone agricole et boisée fragmentée dans le canton d'Aurignac et le milieu urbanisé dans l'agglomération de Nancy. Les bosquets sont proportionnellement plus nombreux en milieu urbain. Les haies sont situées entre les bâtiments, contrairement en milieu agricole où elles sont souvent en bordure de champs.

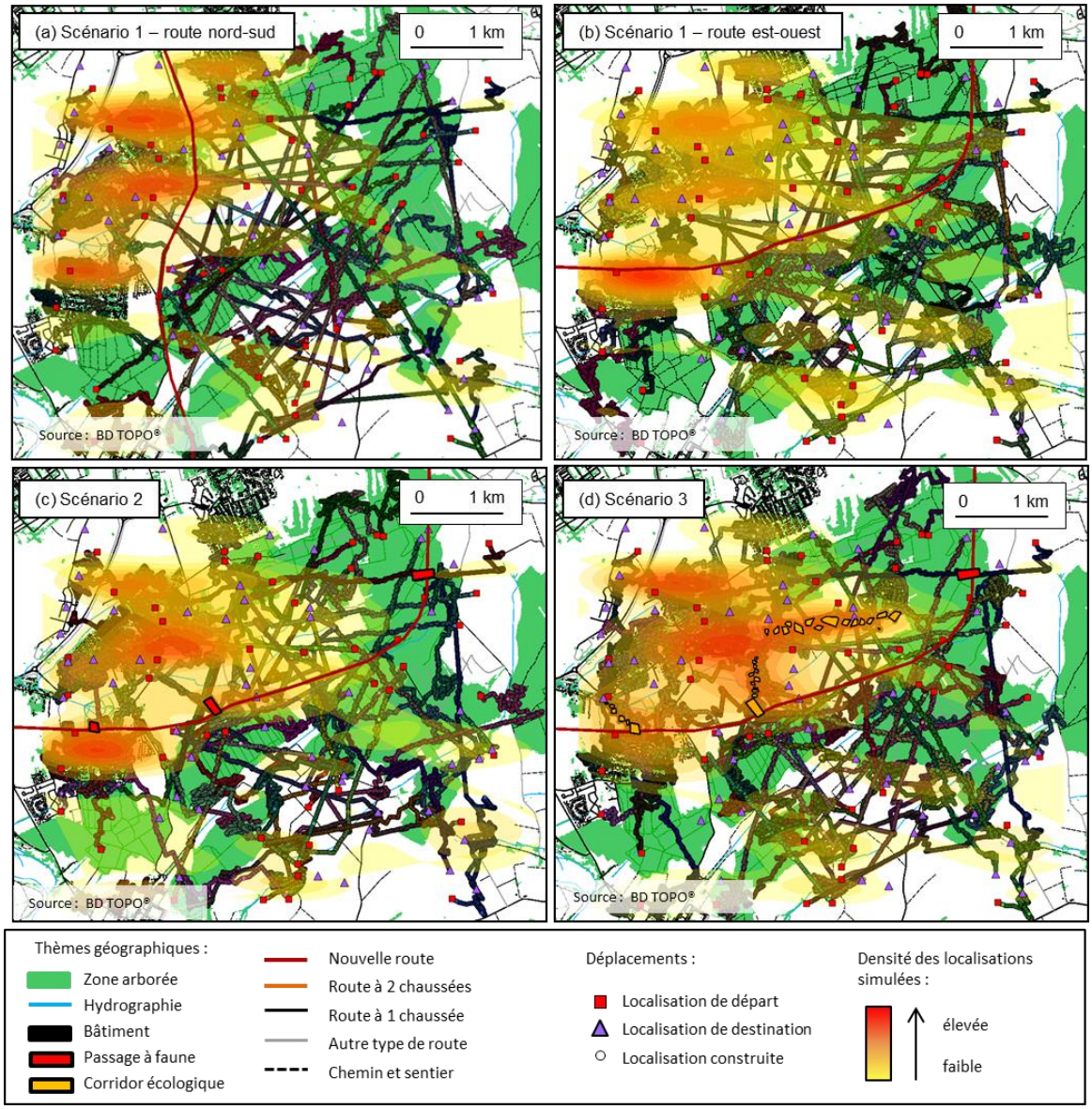


Extraits des deux sites d'étude, à Aurignac (chevreuils) et à Nancy (renards) : a) les données initiales de la BD TOPO® avant la fusion des objets contigus, b) identification des haies et des bosquets.

ANNEXE 11 – ÉVALUATION DES EFFETS D'AMÉNAGEMENTS – CAS DU CHEVREUIL ET DU CERF

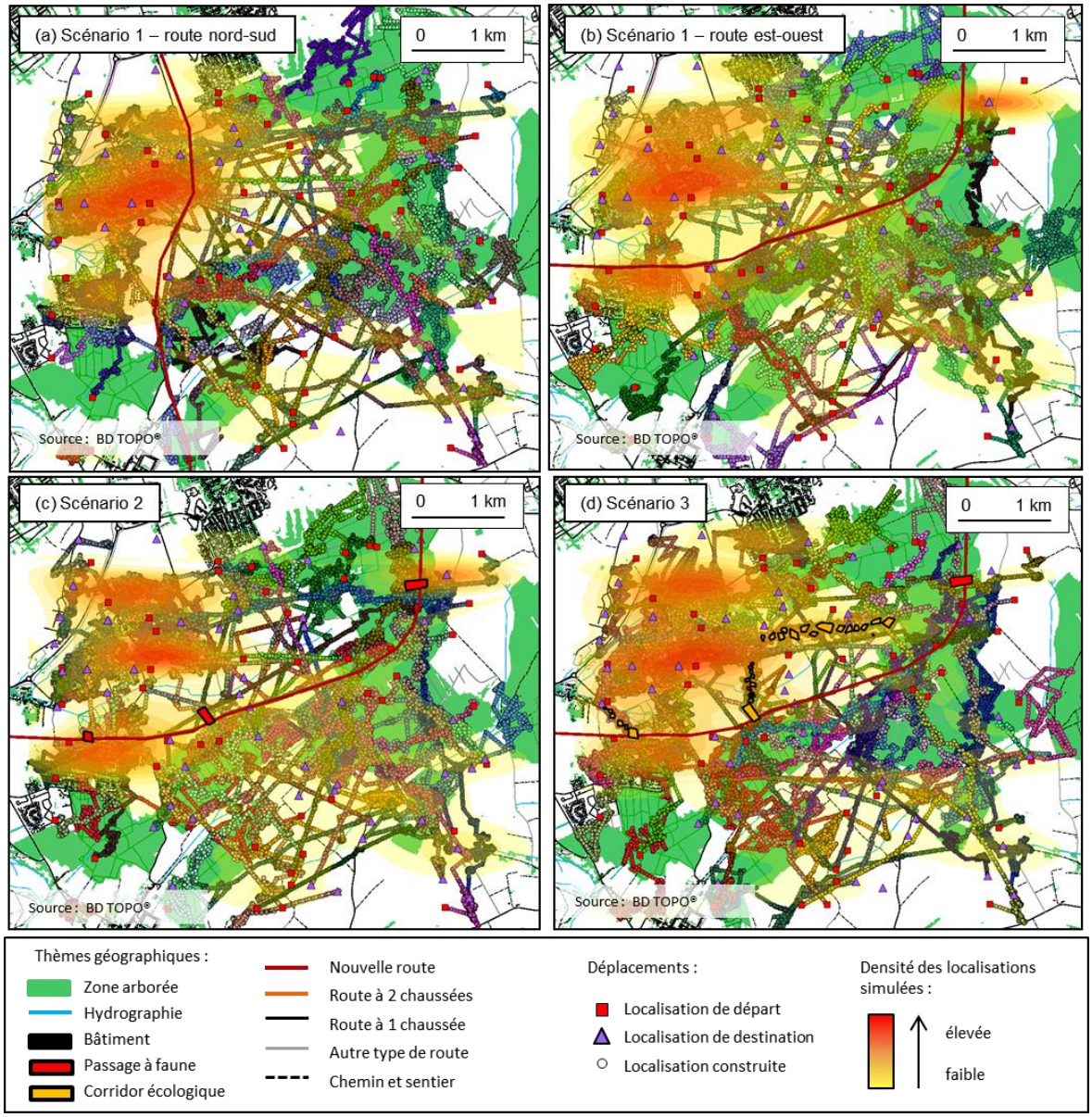
Les résultats de simulation de déplacements suite à des modifications de paysage sont montrés pour les espèces chevreuil et cerf. Les aménagements testés sont ceux de deux nouvelles routes aux tracés différents (scnéario 1), de cette route avec 3 passages à faune (scénario 2) puis de la route avec les 3 mêmes passages à faune accompagnés de corridors écologiques (scénario 3). L'interpolation des localisations par rapport à leur densité permet de visualiser leur répartition. L'effet de barrière de la route se traduit par des concentrations de localisations autour de son tracé, ce qui est particulièrement vrai dans le cas de la route de tracé est-ouest. L'ajout des passages à faune modifie peu la répartition des déplacements. L'ajout de corridors en pas japonais entraîne une certaine concentration autour des éléments de végétation composant le corridor en dehors des espaces non boisés.

1) Chevreuil



Cartographie entre les 3 scénarios d'aménagements pour le chevreuil : a) route nord-sud, b) route est-ouest, c) route et 3 passages à faune, d) route, 3 passages à faune et corridor.

2) Cerf



Cartographie entre les 3 scénarios d'aménagements pour le cerf : a) route nord-sud, b) route est-ouest, c) route et 3 passages à faune, d) route, 3 passages à faune et corridor.

Modélisation des déplacements d'animaux dans un espace géographique – analyse et simulation

Une des préoccupations de la société est de trouver un compromis entre le développement des territoires et la protection de la faune sauvage. La prise en compte des déplacements des animaux lors de projets d'aménagement nécessite de connaître les comportements des différentes espèces et de définir ce qui a une influence sur leur localisation et sur la sélection de leur lieu de vie. Notre objectif est de pouvoir représenter les déplacements d'animaux sur un espace géographique précisément décrit afin ensuite de simuler et d'évaluer les conséquences des aménagements.
Nous avons commencé par analyser l'influence des éléments du paysage sur les déplacements à partir de localisations connues d'animaux comme des traces GPS (suivis menés par l'ELIZ, l'ANSES, l'ONCFS, l'INRA) et de données de description de l'espace notamment la BD TOPO®. Les cas d'étude correspondent à des milieux différents et à trois espèces : renard, chevreuil et cerf. Nous avons pu confirmer le rôle de certains caractères de l'espace selon les cas d'étude. Par exemple les préférences spatiales lors des déplacements des renards en milieu périurbain semblent se porter sur la végétation arborée et des lieux peu occupés par les hommes pendant certaines parties de la journée (parcs, zones d'activités, le long des voies ferrées). Concernant les cervidés en milieu forestier, la pente et le type de peuplement paraissent avoir le plus d'influence sur les déplacements.
À l'aide des connaissances extraites par les analyses et de la littérature, nous avons défini et implémenté dans la plateforme GeOxygene un modèle de simulation de déplacements d'animaux. Les trajectoires sont construites par une approche agent reprenant le comportement spatial selon l'espèce et l'influence des éléments du paysage favorables ou faisant obstacle. Nous effectuons une analyse critique de notre modèle puis nous proposons des pistes d'enrichissement à l'aide de la comparaison avec les observations et le retour des écologues. Enfin des scénarios d'aménagement sont testés dans le but de mettre en évidence leur impact et leur efficacité.

Mots-clés : bases de données géographiques, localisations GPS et VHF, faune, déplacement, préférence spatiale, obstacle, simulation agent, aménagement du territoire

Modelling animal movements on a geographical space – analyses and simulation

Finding compromises between human development and wildlife protection is one concern of society. Taking into account animal movements in planning projects requires some knowledge on species behaviours and on what determines their localizations and their habitat places. Our goal is to be able to represent animal movements on an accurate geographical space in order to simulate and to evaluate the consequences of planning decisions.
We first analysed how the features of the landscape influence movements from collected localizations on animals, for example GPS tracks (studies of ELIZ, ANSES, ONCFS, INRA) and from data describing space such as BD TOPO®. The studied cases are about several types of environment and three species: red fox, roe deer and red deer. We found some results that confirm the role played by the spatial features, depending on the studied cases. For instance in a periurban environment, foxes seem to be more in wooded patches and in places with few human activities during some parts of the day (squares, areas with industrial or commercial activities, sides of railways). In a forested environment, deers are more likely to be influenced by slope and forest stands.
Thanks to knowledge from data analyses and to literature, we defined a simulation model for animal movements. We implemented it in the GeOxygene platform. The trajectories are built with an agent approach by taking into account the spatial behaviour of the species and the influence of elements that favour or hinder movements. We proposed a critical view of the modelling choices and some improvements from the comparison with observations and experts advices. Then, scenarios with infrastructures are defined so that to identify their impact and their efficiency.

Keywords: geographical databases, GPS and VHF localizations, fauna, movement, spatial preference, obstacle, agent-based simulation, planning