CARTOGRAPHIE ET CARACTÉRISATION DES LIEUX D'INTÉRÊT DE CERVIDÉS EN MILIEU FORESTIER

par Laurence Jolivet

LASTIG, Univ Gustave Eiffel, ENSG, IGN
F-94160 Saint-Mandé, France,
laurence.jolivet@ign.fr

Florian Masson

Bureau de Recherches Géologiques et Minières
f.masson@brgm.fr

et Sonia Saïd

Office français de la biodiversité
sonia.said@ofb.gouv.fr

La faune influence son environnement spatial et cet environnement influence en retour l'utilisation de l'espace par la faune. En gestion forestière, il est nécessaire de protéger les parcelles sensibles à la pression des animaux. Notre objectif est de proposer des cartes pertinentes pour la gestion, contenant les déplacements individuels et les espaces utilisés selon les espèces animales, ainsi que leur contexte spatio-temporel. Le cas d'étude concerne deux espèces, le chevreuil et le cerf, dans un site en milieu forestier au nord-est de la France. Les déplacements de plusieurs individus ont été analysés à partir de localisations GPS. Les lieux d'intérêt pour la recherche de nourriture supposés correspondre à des comportements de recherche intensive ont été calculés par la méthode du Temps de Premier Passage. Ces lieux ont ensuite été caractérisés avec les éléments du paysage et des indications de temporalité. Des cartes ont été réalisées afin de visualiser les informations disponibles sur ces lieux d'intérêt, en définissant des symbolisations adaptées. Des cartes ont aussi été réalisées par rapport à l'espace fonctionnel comprenant des parcelles favorables ou évitées issues de la comparaison entre espace parcouru et espace disponible. Ces parcelles sont qualifiées selon un gradient d'intérêt potentiel par espèce animale. Le processus cartographique a été effectué afin d'obtenir des cartes adaptées à l'affichage dans un portail géographique numérique et à la lecture par des utilisateurs impliqués en gestion forestière et en aménagement.

***Mots-clés** : faune, gestion forestière, paysage, carte, temps de premier passage*

Introduction

L'utilisation de l'espace par la faune sauvage est étroitement liée aux caractéristiques de l'environnement spatial. Par sa composition et sa structure, l'environnement spatial influence la présence et le déplacement des animaux, à une échelle individuelle, d'une population et d'une espèce (Ethier *et al.*, 2011 ; Nellemann *et al.*, 2001). Pour les cervidés vivant en milieu forestier, la qualité de l'habitat, liée à la qualité et à la quantité de nourriture disponible, a un effet sur des caractéristiques individuelles telles la masse corporelle et la taille du domaine vital, et par conséquence sur les dynamiques et les distributions spatiales des populations (Kjellander *et al.*, 2006 ; Widmer *et al.*, 2004). Par ailleurs, les animaux influencent leur environnement. Ils peuvent modifier certains éléments par leurs comportements, par exemple lors de la recherche de nourriture, l'écorçage ou le piétinement (Plumptre, 1993).

Le contexte d'application du travail présenté est la prise en compte en gestion forestière de l'utilisation de l'espace par la faune. Le maintien du bon fonctionnement des écosystèmes forestiers est un défi majeur car plusieurs enjeux sont interdépendants : une bonne santé chez la végétation, la régénération des peuplements d'arbres, la préservation des habitats pour la faune, l'accessibilité pour les activités économiques et les loisirs. Concernant la faune, une des problématiques en gestion forestière est que des individus peuvent être présents dans des zones supportant difficilement les conséquences de cette présence. Par exemple, le chevreuil apprécie de manger les jeunes pousses et arbres. Ainsi, des parcelles de forêt en régénération et contenant donc des jeunes arbres, sont parfois exploitées de manière intensive alors que pour se développer, il faudrait peu de perturbations (Hanley, 1996). Être capable de localiser des parcelles qui attirent particulièrement

des animaux est une étape clé dans l'ensemble du processus de gestion.

Les parcelles de forêt sont utilisées préférentiellement selon les besoins des espèces animales. Les variables environnementales à prendre en compte sont les caractéristiques paysagères ainsi que la temporalité et la présence d'autres individus et espèces animales. Les caractéristiques paysagères comprennent la composition spatiale des éléments du paysage : par exemple le type de végétation et le relief qui peuvent respectivement correspondre aux ressources alimentaires et au coût énergétique des déplacements (Boulanger *et al.*, 2015 ; Rooney, 2001). Ces caractéristiques incluent de plus la configuration spatiale : en représentant possiblement des couloirs de déplacement ou des obstacles et en définissant la visibilité dont peut dépendre la protection. La temporalité concerne l'heure de la journée, la saison ou toutes autres périodes et durées significatives dans l'utilisation de l'espace. La présence d'autres animaux, dont les humains, a une influence car elle peut déclencher une réaction de rencontre ou d'évitement.

L'utilisation de l'espace par les animaux est connue grâce à des observations directes ou indirectes et à des localisations enregistrées. Les dispositifs GPS permettent de suivre la localisation des individus avec une grande précision spatiale et une fréquence temporelle élevée. La description de l'environnement spatial est disponible dans des bases de données géographiques existantes à partir desquelles il peut être abordé par une lecture thématique et sélective. La notion d'espace fonctionnel repose sur la caractérisation des éléments du paysage en fonction de leur influence sur l'utilisation par les animaux (Forman *et al.*, 1986). Les éléments du paysage peuvent être utilisés parce qu'ils répondent à des besoins, ou au contraire peuvent être inutilisés voire évités. L'espace fonctionnel est défini par rapport à un individu ou un groupe d'individus, de la même espèce animale ou d'espèces distinctes. Certains aspects peuvent être mis en évidence, par exemple dans la détermination du paysage de la peur ou du paysage correspondant aux ressources alimentaires (Olsoy et *al.* (2015). Des recherches en sciences de l'information géographique portent sur l'extraction et la visualisation de cet espace fonctionnel, et donc de toute information pertinente qui expliquerait cet espace (Andrienko et *al*, 2012 ; Spretke *et al.*, 2011). L'extraction d'informations se concentre ici sur les variables environnementales. La visualisation consiste à synthétiser notamment par une sémiologie adaptée, les informations extraites et les résultats d'analyses. Dans le contexte de gestion forestière, les lieux d'intérêt des animaux sont particulièrement intéressants. Un lieu d'intérêt est défini dans cet article comme une partie de l'espace correspondant à un comportement spécifique (recherche de nourriture, repos, déplacement) et ainsi à une présence notable d'un animal. Un lieu peut être reconnu comme d'intérêt car une présence animale a été observée. Un lieu peut être potentiel lorsqu'il est supposé comme favorable à la présence animale.

L'objectif principal est d'identifier des lieux d'intérêt à partir de localisations individuelles obtenues par GPS puis de caractériser et cartographier ces lieux à partir de bases de données de description de l'espace. Notre étude se concentre sur deux espèces, le cerf élaphe et le chevreuil, dans une zone forestière de moyenne montagne. Les cartes finales attendues ont vocation à être des supports pour explorer des jeux de données GPS contenant des connaissances non explicites, pour diffuser et communiquer sur les résultats d'analyses et enfin, pour faciliter la prise en compte des informations disponibles lors d'actions de gestion et d'aménagement du territoire.

Matériel et méthode

Matériel

Le cas d'étude

Le cas d'étude concerne le cerf élaphe (*Cervus elaphus*) et le chevreuil (*Capreolus capreolus*) vivant en milieu forestier. Le site de suivi est la réserve de La Petite Pierre dans les Vosges dans l'est de la France. La réserve est gérée par l'Office français de la biodiversité (OFB) et l'Office national des forêts (ONF). Sa superficie est égale à 30 km². La couverture du sol est principalement forestière et le paysage est fermé. Les peuplements sont pour moitié d'arbres feuillus, en majorité hêtre, chêne et charme, et pour l'autre moitié de résineux dont des sapins, épicéas et pins sylvestres (Storms *et al.*, 2004). Le relief est montagneux avec des altitudes comprises entre 180 m et 420 m. Les sentiers, les chemins et les routes forestières sont accessibles à tous, avec pour consigne de ne pas s'en éloigner. Quelques bâtiments et zones d'habitations sont dispersés. Les perturbations pour la faune sauvage proviennent des activités de loisirs (randonnée), des activités de services et du trafic associé (gestion forestière) et de la chasse qui est régulée et a lieu quelques jours par année. Les alentours de la réserve sont également couverts par la forêt jusqu'à au moins 1 km. Au-delà, le paysage devient plus ouvert et se compose de cultures agricoles, de prairies et de zones habitées.

Les cerfs et les chevreuils ont des comportements spatiaux différents dûs à leurs besoins spécifiques

et à leurs rythmes. Dans notre travail de recherche, seules les adultes femelles ont été étudiées car celles-ci possèdent des domaines vitaux généralement fixés et effectuent peu de déplacement de migration.

Les femelles du chevreuil (chevrettes) sont solitaires ou vivent en groupes familiaux restreints. Les chevreuils ont des domaines vitaux limités (Mysterud, 1999), néanmoins les cœurs de ces domaines peuvent bouger en fonction de la saison (Le Corre *et al.*, 2008). Dans le site d'étude, les domaines vitaux ont pour surface moyenne 0,5 km². Le régime alimentaire est composé principalement de végétation semi-ligneuse (arbustes). Les chevreuils sont des *income-breeder* (Saïd *et al.*, 2005), ce qui implique que les individus se nourrissent et s'alimentent alternativement pendant de courtes périodes.

Les femelles du cerf (biches) vivent en hardes. Les cerfs ont des domaines vitaux plus grands que les chevreuils, avec des cœurs pouvant ne couvrir qu'une petite partie (Náhlik *et al*. 2009). Dans le site d'étude, les surfaces varient en fonction de la période de l'année et sont en moyenne égales à 2,5 km². Les individus sont peu actifs et préfèrent le couvert forestier pendant le jour. Ils s'alimentent plus activement au crépuscule et à l'aube en forêt et dans les zones ouvertes comme les prairies (Ager *et al.*, 2003). Le régime alimentaire est composé de végétation herbacée, semi-ligneuse et ligneuse (Boulanger *et al.*, 2015).

Localisations GPS des animaux et bases de données géographiques

Les localisations GPS des animaux ont été collectées par l'OFB (Storms *et al.*, 2008). Nous avons travaillé sur un extrait du jeu de données complet du site, en sélectionnant les années de suivi et en visant des comportements spatiaux comparables entre les individus (domaine vital inclus principalement dans la réserve par exemple). L'extrait concerne 3 chevreuils et 6 cerfs. Pour chaque individu, les enregistrements couvrent 5 journées, en 2007 et en 2008. L'intervalle de temps programmé entre les localisations enregistrées est égal à 5 minutes. Le taux de succès d'enregistrement est de 85 %. La précision spatiale des localisations est estimée entre 0 et 30 mètres.

La description de l'environnement spatial est fournie par les bases de données produites par l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN). Les différentes bases correspondent à une thématique, une résolution spatiale et une fréquence de mise à jour particulières. Elles contiennent des informations de relief, de couverture des sols (peuplements forestiers, hydrographie, bâti, réseau routier et chemins, prairies, cultures agricoles) et d'usage des sols (exploitation forestière, industrie, secteur tertiaire, résidentiel, agriculture). La précision géométrique est métrique pour des éléments localisés comme les points d'eau, les bâtiments, les routes. La résolution est de 25 m² pour le modèle numérique de terrain utilisé, 500 m² pour les zones arborées et 5 000 m² pour les peuplements forestiers. Ces bases de données sont visualisées dans le Géoportail (https://www.geoportail.gouv.fr/) et téléchargeables sur le site des Géoservices (https://geoservices.ign.fr/).

Méthode

L'approche méthodologique a été d'analyser puis de cartographier l'utilisation de l'espace par les animaux à partir des localisations GPS et des données de description de l'espace. En premier lieu, une modélisation des déplacements a été réalisée à partir des distances et des vitesses estimées grâce aux localisations GPS. En second lieu, les lieux d'intérêt ont été localisés à partir de cette modélisation et caractérisés par les éléments du paysage. Puis l'espace fonctionnel, à une échelle individuelle et à l'échelle du site d'étude, a été déterminé en s'appuyant sur les lieux d'intérêt caractérisés. Enfin des cartographies des résultats d'analyse ont été réalisées en effectuant des choix sur l'implantation géométrique et la symbolisation.

Modèle de déplacement et calcul des arrêts de recherche de nourriture

La modélisation des déplacements est intéressante pour mettre en évidence des comportements individuels partagés ou non au sein d'une même espèce animale, ici les chevreuils et les cerfs, et pour comparer les comportements entre les espèces. Nous souhaitions différencier les types de lieux d'intérêt en fonction de comportements particuliers, aussi les arrêts et les déplacements rapides sont considérés (Buard, 2011; Spaccapietra 2008). Un arrêt est défini comme une succession de localisations connues correspondant à des vitesses faibles, relativement à l'ensemble des déplacements, et situées dans une surface limitée. Nous avons étendu cette définition d'un arrêt en deux sous-types : arrêt de recherche de nourriture avec un comportement actif et arrêt de repos avec peu ou pas de déplacement. Un déplacement rapide est défini comme une succession de localisations correspondant à de longues distances parcourues et à des vitesses élevées. Notre modèle de déplacement individuel est donc peuplé d'arrêts de recherche de nourriture, d'arrêts de repos et de déplacements rapides. La priorité étant d'identifier les parcelles forestières sensibles à la pression de prédation animale, nous nous concentrons dans cet article sur les arrêts de recherche de nourriture.

Dans notre cas d'étude, les localisations connues des animaux sont des enregistrements GPS contenant les coordonnées spatiales et la date. Le modèle de déplacement s'est appuyé sur des indices de description géométrique : distances et vitesses estimées. Les distances sont calculées par interpolation linéaire entre les localisations consécutives, ce qui correspond au plus court chemin. Même pour les 15 % de localisations programmées mais non enregistrées, les vitesses ont été calculées à partir des distances et de la durée allongée entre localisations. Les distances estimées sont a priori plus faibles que les distances parcourues réellement et les vitesses estimées plus grandes. La description des déplacements peut être synthétisée en utilisant des critères comme la moyenne, le maximum, et l'écart-type. Cette synthèse peut être calculée par unité de temps pertinente comme un jour, une saison, une année, plusieurs années, et par individu ou groupe d'individus.

Afin d'extraire les arrêts de recherche de nourriture, l'algorithme implémenté est le Temps de Premier Passage (TPP) qui est intéressant pour identifier des comportements de recherche intensive (Fauchald *et al.*, 2003 ; Le Corre *et al.*, 2008). Le TPP extrait des groupes de points et donc des périodes de temps et des surfaces associées, quand et où le rythme des déplacements varient beaucoup. L'hypothèse est que cette variation indique un comportement de recherche intensive comme la recherche de nourriture. L'algorithme exploite la durée qu'un individu met à sortir d'un cercle d'un certain rayon correspondant ainsi à une certaine échelle spatiale de recherche pour cette durée. La 1ère étape du TPP est le calcul pour chaque localisation GPS de la variance des logarithmes des durées pour sortir du cercle, en fonction de la valeur du rayon de ce cercle. Les valeurs de rayons correspondant à un des maxima locaux, c'est-à-dire des variances élevées, sont sélectionnés. Ils sont considérés comme des échelles spatiales pertinentes d'effort de recherche. Dans notre implémentation, les rayons de moins de 30 m ne sont pas pris en compte, en raison de la précision du GPS. La plus petite valeur de rayon supérieure à 30 m est sélectionnée car a priori correspondant à l'effort de recherche le plus intensif. Les autres valeurs correspondant à des maxima locaux sont également stockées et associées à des échelles spatiales plus petites et des étendues plus larges d'effort de recherche mais a priori ces efforts sont moins intensifs et donc non pris en compte dans cet article. La 2ème étape du TPP est de représenter les durées pour le rayon de cercle sélectionné en fonction des localisations GPS chronologiquement classées. Des groupes de points successifs sont extraits selon deux paramètres. Un paramètre est un seuil minimal pour les durées. Ce seuil peut être légèrement modifié entre les individus et les jours de suivi. Il a été fixé entre 1 et 2 heures. Le second paramètre est un seuil minimal de nombre de localisations dans le groupe. Il a été fixé à 12 localisations, avec la possibilité que 3 points maximum aient successivement des durées inférieures à la valeur du premier paramètre. La valeur de 12 localisations est cohérente avec le nombre de points à partir duquel il est possible d'estimer un domaine vital. Le résultat est un ensemble de clusters, chaque cluster contenant au moins 12 localisations avec des variances élevées sur les durées. Un cluster est supposé être une zone de recherche restreinte (ZRR) avec une certaine valeur de rayon. L'implémentation de l'algorithme a été effectuée dans un script R.

Du modèle de déplacement aux lieux d'intérêt

Les lieux d'intérêt pour la recherche de nourriture sont déduits des arrêts de recherche de nourriture intégrés au modèle de déplacement. Ces lieux contiennent a priori des éléments intéressants pour les animaux qui y sont activement présents et qui prélèvent la végétation, et nécessitent des mesures de protection par les gestionnaires. Les autres types de lieux d'intérêt, déduits des arrêts de repos et des déplacements rapides, sont a priori moins prélevés. Les lieux de recherche de nourriture sont interpolés par enveloppe convexe des clusters de localisations ZRR. L'enveloppe convexe surestime les surfaces réellement parcourues mais garantit leur prise en compte complète. La géométrie obtenue est un polygone ZRR.

Les polygones ZRR sont décrits avec des informations de trois thèmes : le comportement de l'animal, les éléments du paysage et le contexte temporel. Le 1er thème du comportement individuel contient : le rayon TPP ; l'aire du polygone ZRR ; la durée de séjour dans le polygone ZRR ; la distance parcourue estimée ; la vitesse de déplacement moyenne ; lorsque disponibles les autres informations données par le GPS tels les mouvements de tête indiquant une activité. Pour le 2ème thème, les éléments du paysage ont été sélectionnés selon leur intersection avec le polygone ZRR. Certains éléments ont été synthétisés par valeurs moyennes : présence ou absence de couverture arborée (les clairières par exemple) ; si couverture arborée, alors le nombre de types de peuplements forestiers ; le nom du peuplement principal, du deuxième et du troisième plus important ; la présence d'autres couvertures du sol comme les prairies, les cultures agricoles, les routes (même si le trafic est faible, elles peuvent représenter des ouvertures dans le paysage) et les

bâtiments ; le relief par les altitudes et les pentes et l'exposition majoritaire. Le 3ème thème comprend : le jour de l'année et la saison correspondante ; l'heure d'entrée et de sortie dans le polygone ZRR ; la période de la journée correspondante (aube, milieu de journée, crépuscule ou nuit). Les couches SIG contenant les polygones ZRR ont été croisées avec les données GPS et de description de l'espace. Chaque information des thèmes a été écrite dans un champ de la table attributaire des polygones ZRR, facilitant ainsi leur analyse et leur cartographie. Des champs complémentaires ont été ajoutés : nom unique donné à l'animal, son espèce, des commentaires libres. L'analyse spatiale et l'édition des tables ont été réalisées avec La plateforme SIG open source GeOxygene (Badard *et al.*, 2004).

Des lieux d'intérêt à l'espace fonctionnel

En plus de déterminer des lieux d'intérêt locaux, un autre aspect intéressant en gestion forestière est de pouvoir caractériser l'ensemble d'un site d'étude, et donc des lieux d'intérêt potentiels en dehors de ceux où des animaux ont été observés. Ces lieux potentiels peuvent être favorables ou non à la présence de la faune et constituent l'espace fonctionnel sur l'étendue du site d'étude. Notre approche a été de déduire une caractérisation de cet espace à partir des lieux d'intérêt observés et caractérisés qui peuvent correspondre à des préférences ou des évitements spatiaux (Matthiopoulos, 2003). Une préférence spatiale par rapport à un type d'élément du paysage est identifiée lorsque son utilisation par un animal est significativement plus importante comparé aux autres types d'éléments disponibles. Au contraire, il y a évitement spatial par rapport à un élément lorsque l'utilisation est significativement faible, ou inexistante.

Les préférences et évitements spatiaux ont été détectés à deux niveaux : les lieux d'intérêt et l'ensemble de l'espace parcouru. Premièrement, les lieux d'intérêt de recherche de nourriture sont comparés avec l'espace utilisé par individu. L'espace utilisé par individu est calculé par enveloppe convexe de tous les enregistrements GPS. Il inclut alors également les arrêts et les déplacements rapides. C'est une estimation du domaine vital. Sa caractérisation est la même que celle des polygones ZRR (2.2.2). Deuxièmement, l'espace utilisé est comparé à l'ensemble du site d'étude. L'espace fonctionnel correspondant est composé de parcelles favorables ou non aux chevreuils et aux cerfs selon leur composition et configuration paysagères. Afin de réaliser des tests statistiques de significativité, l'espace a été divisé en grilles régulières de 25 m de résolution (celle du MNT) et cohérentes avec la précision du GPS. Chaque cellule de la grille est décrite par les éléments du paysage et par son inclusion ou non dans l'espace effectivement utilisé par un animal. Le test de Mann-Whitney a été utilisé pour comparer la présence et l'absence par cellule. Puis le test du khi-deux a permis de prendre en compte les déplacements selon leur vitesse : un nombre important de localisations GPS dans une même cellule indique des déplacements lents et un nombre faible des déplacements rapides.

Les couches SIG produites pour l'espace fonctionnel sont des polygones construits à partir des objets existants des bases de données de description de l'espace. Le site étant en milieu forestier, les peuplements forestiers sont la couverture du sol majoritaire et les polygones ont été découpés et fusionnés à partir de la couverture forestière et d'éléments davantage localisés (routes). Un champ attributaire a été édité selon le gradient d'intérêt potentiel en trois valeurs – faible, moyen, élevé – pour les chevreuils puis pour les cerfs. L'implémentation a été menée dans R et dans le SIG GeOxygene.

Définition des spécifications cartographiques

Les spécifications cartographiques ont été définies pour les lieux d'intérêt et l'espace fonctionnel. L'interface de visualisation numérique est un portail géographique affichant des fonds cartographiques accessibles par Web Map Service (WMS) et Web Feature Service (WFS) : plans, cartes topographiques, images aériennes, satellites, cartes thématiques (par exemple carte forestière). L'interface permet de superposer des données institutionnelles partagées et des données propres à notre cas d'étude. Les règles de cartographie visent à proposer des cartes lisibles (nombre réduit d'objets, niveau de détail adapté) et claires dans les informations transmises. La représentation pour de mêmes objets de plusieurs attributs peut s'appuyer sur les principes de sémiologie graphique et des variables visuelles comme définies par Bertin (1967). Les variables visuelles doivent être assignées de manière appropriées aux informations cartographiées pour une lecture efficace.

Le défi est de prendre en compte les différentes échelles spatio-temporelles des lieux d'intérêt observés ou potentiels et d'afficher plusieurs valeurs attributaires sur ces lieux. Les lieux observés sont les polygones ZRR de surfaces limitées et de durée courte car correspondant à une recherche active. Les géométries à représenter sont les localisations GPS et les polygones ZRR. La symbolisation concerne les informations par rapport à l'animal, à son comportement, aux éléments du paysage et au contexte temporel. L'espace fonctionnel est déduit

pour la surface du site et supposé constant jusqu'à des changements du paysage. Les géométries sont les polygones d'intérêt potentiel. Leur symbolisation doit être adaptée au gradient d'intérêt. Toutes les cartes produites ont été réalisées dans QGIS avec les services en ligne du Géoportail.

Résultats

Description des déplacements enregistrés et des arrêts de recherche de nourriture

Les distances parcourues par un individu et par jour sont en moyenne estimées à 8 km pour les chevreuils et 10 km pour les cerfs. Les vitesses moyennes sont respectivement 350 m/h et 450 m/h et les espaces parcourus de superficies moyennes égales à 0,1 km² et 0,6 km². Pour les chevreuils, des périodes de déplacements rapides sont régulièrement espacées de 4 ou 5 heures. Pour les cerfs, des déplacements rapides sont observés environ pendant deux phases par jour. Pouvant être lus au regard de cette description des déplacements, les arrêts de recherche de nourriture, issus des clusters ZRR de localisations GPS de la méthode TPP, sont :

- Pour les chevreuils : 1 à 4 arrêts par individu et par jour (2 en moyenne). Pour les 5 jours de suivis, 9 arrêts en moyenne ont été calculés par individu. Le pourcentage de points GPS détectés comme un arrêt est 20 % par individu et par jour. La durée d'un arrêt est entre 1 et 5 heures (2 en moyenne) ;
- Pour les cerfs, 1 à 6 arrêts par individu et par jour (légèrement supérieur à 2 en moyenne). Pour les 5 jours de suivis, 11 arrêts en moyenne ont été calculés par individu. Le pourcentage de points GPS détectés comme un arrêt est 30 % par individu et par jour. La durée d'un arrêt est entre 1 et 10 heures (3 en moyenne)

Il existe de légères différences entre les deux espèces animales concernant le nombre d'arrêts. Des différences plus notables concernent la durée des arrêts, ce qui peut être expliqué par le fait que les chevreuils alternent entre de courtes périodes d'alimentation et de repos alors que les cerfs sont bi-phasiques pendant une journée et possèdent des phases d'activités plus longues.

Caractérisation des lieux d'intérêt de recherche de nourriture et de l'espace utilisé

Dans notre cas d'étude, les polygones ZRR ont une superficie entre 200 m² et 2 500 m² (en moyenne 600 m²) (figure 1). Pour les cerfs, les superficies varient entre 150 m² et 11000 m² (en moyenne 1300 m²).

Une description de synthèse des polygones ZRR révèle le type de peuplement forestier principalement parcouru lors des efforts de recherche intensif, par les chevreuils : les jeunes plantations et avec des coupes forestières (pour 50 % des polygones ZRR) puis les peuplements mélangés de feuillus et résineux (40 %) ; et par les cerfs : les jeunes plantations et avec des coupes forestières (pour 50 % des polygones ZRR) puis les chênaies (20 %). Pour les cerfs en particulier, 10 % des polygones ZRR sont situés près de milieux ouverts comme des clairières ou des prairies. Concernant les pentes, elles restent modérées, en moyenne égales à 10° pour les chevreuils et les cerfs.

Les espaces journaliers parcourus par les individus sont en moyenne 0,1 km² pour les chevreuils (exemple en figure 1) et 0,5 km² pour les cerfs. Les polygones ZRR sont 40 fois moins étendus que ces espaces. Le jeu de données GPS contient assez de localisations (1 000 points minimum par individu) et est bien réparti dans le temps (enregistrements à toutes les saisons) pour estimer l'espace utilisé annuellement soit le domaine vital. En moyenne par individus, la superficie est égale à 0,5 km² pour les chevreuils (figure 1) et 2,5 km² pour les cerfs. Lorsque toutes les localisations GPS sont prises en compte, celles-ci sont majoritairement situées dans les jeunes plantations et avec des coupes forestières (20 % pour les chevreuils et 30 % pour les cerfs). Ensuite, ce sont pour les deux espèces les peuplements de feuillus (chêne, hêtre) et des peuplements mixtes feuillus et résineux. Les cerfs parcourent également des parcelles avec des herbacées et des plantes ligneuses. La description des lieux d'intérêts de recherche de nourriture paraît cohérente avec la description des domaines vitaux.

Estimation de l'espace fonctionnel du site d'étude

Les caractéristiques paysagères correspondant aux localisations GPS ont été comparées aux caractéristiques de la totalité du site d'étude correspondant à l'espace disponible, ce qui a permis de formuler des hypothèses sur les préférences et les évitements spatiaux. Afin de confronter ces hypothèses, le test de Mann-Whitney a été réalisé : la présence est significativement plus importante dans les jeunes plantations et coupes forestières ainsi que dans les chênaies pour les chevreuils et les cerfs. Il y a une absence significative des hêtraies et des peuplements de résineux. Pour les chevreuils, une préférence supplémentaire concerne les peuplements mixtes feuillus et résineux. Pour les cerfs, un évitement concerne les peuplements mixtes

à majorité de feuillus. Le test du khi-deux a permis de distinguer les déplacements selon leur vitesse : les jeunes plantations et coupes forestières et les chênaies sont parcourues avec des vitesses rapides et lentes par les chevreuils et les cerfs ; les hêtraies avec des vitesses rapides par les chevreuils ; les plantations mixtes avec des vitesses rapides par les deux espèces animales ; les autres types de peuplements ne sont pas significativement parcourus en fonction des vitesses. Le test de Mann-Whitney appliqué aux pentes indique des valeurs plus faibles (en moyenne 8° pour les chevreuils et 13° pour les cerfs) lorsque comparées au site d'étude (en moyenne 17°). Concernant les autres éléments du paysage, des évitements ont été identifiés pour les chevreuils par rapport aux réseaux de routes, chemins et sentiers et aux bâtiments ; des préférences ressortent pour les cerfs par rapport à la proximité des cours d'eau et des routes forestières, ce qui peut être dû à une préférence pour certaines espèces de plantes et à une facilité de déplacement. Pour l'espace fonctionnel des chevreuils et des cerfs, un intérêt potentiel a été déduit comme élevé vis-à-vis des jeunes plantations et coupes forestières et des chênaies associées à des pentes faibles, moyen vis-à-vis des peuplements mixtes pour les chevreuils et des lieux à proximité des cours d'eau et des routes forestières pour les cerfs, et enfin faible pour les peuplements de résineux et les bâtiments pour les deux espèces animales.

La cartographie des lieux d'intérêt observés et potentiels

Lieux d'intérêt pour la recherche de nourriture

Afin de cartographier les lieux d'intérêt pour la recherche de nourriture, les polygones ZRR ont été symbolisés avec des variables visuelles adaptées aux informations de caractérisation, et parfois accompagnés de texte écrit. Selon le type d'informations, et donc de champ dans la table attributaire (nombre, pourcentage, renseignement qualitatif), une ou plusieurs variables visuelles sont définie (par exemple renseignement qualitatif représenté par de la couleur ou par la forme). Les modalités des variables visuelles sont définies en fonction des valeurs attributaires. Les variables visuelles peuvent être combinées, jusqu'à symboliser quatre attributs pour les polygones ZRR. La table 1 propose des associations entre variables visuelles et quelques attributs sélectionnés.

	Fond cartographique affiché							**Non affiché**	
Variables visuelles	Pour les déplacements style de trait	Épaisseur du contour	Style du contour	Teinte du contour	Valeur du contour	Si cercle taille	Texte	Teinte	Valeur
Saison									
Heure d'entrée									
Durée									
Peuplement majoritaire									

Table 1. Des variables visuelles associées (cases en grisé) aux attributs caractérisant les lieux d'intérêt observés pour la recherche de nourriture : celles-ci peuvent être appliquées aux polygones ZRR ou à des cercles, et varier selon qu'un fond cartographique est affiché ou non.

Une autre proposition est d'utiliser pour les lieux d'intérêt, un cercle centré sur le centroïde du polygone ZRR. Un cercle est moins précis en étendue et en forme de contour que le polygone ZRR calculé, néanmoins cette géométrie est pertinente pour représenter le rayon du TPP sélectionné afin d'extraire les clusters ZRR. Le fond cartographique composé des couches appelées en WMS ou WFS peut être affiché ou non. S'il l'est, il sera au maximum visible et donc les géométries polygones ou cercles ne seront pas remplies. La figure 2 est une carte des lieux d'intérêt d'une biche pendant trois journées distinctes. Les spécifications étaient : l'utilisation des polygones ZRR, la représentation de quatre attributs (saison, heure d'entrée, durée, peuplement forestier majoritaire), affichage du fond cartographique.

La saison est symbolisée par le style du contour (plein ou pointillé). La période de la journée, ici l'heure d'entrée, est représentée par la teinte du

contour. La durée de séjour dans le polygone ZRR est proportionnelle à l'épaisseur du contour. Le peuplement forestier majoritaire est écrit afin de ne pas surcharger la symbolisation et de laisser au maximum visible le fond cartographique. La carte proposée permet une vision d'ensemble et synthétique des lieux d'intérêt de leur caractérisation. Sa lecture rend compte d'un effort intensif de recherche de nourriture dans les jeunes plantations et coupes forestières, plutôt pendant la journée, ainsi que pendant la nuit dans une des clairières.

La figure 3 présente une carte alternative à celle de la figure 2, qui se concentre sur la temporalité et les éléments du paysage. Les spécifications sont : l'utilisation du cercle, la représentation des mêmes quatre attributs que dans la figure 2, pas de contrainte sur la visibilité du fond cartographique. Les localisations GPS interpolées en un ensemble de segments sont symbolisées, ici en blanc, afin de disposer d'une estimation de l'étendue et de la forme des déplacements.

En figure 3, les attributs sont associés aux mêmes valeurs visuelles qu'en figure 2. Le relâchement de la contrainte sur la visibilité du fond cartographique permet de remplir l'intérieur des cercles et de symboliser les peuplements forestiers majoritaires par des teintes (ici reprises des légendes des cartographies forestières institutionnelles). Le cercle permet de représenter directement le plus petit rayon significatif issu de la méthode TPP.

Espace fonctionnel

Des cartes de l'espace fonctionnel ont été produites distinctement pour les chevreuils et les cerfs, même si certaines préférences et évitements spatiaux sont similaires à l'échelle du site d'étude. La carte en figure 4 contient des parcelles qualifiées selon le gradient défini d'intérêt potentiel pour les cerfs et symbolisées par un gradient de valeurs.

La carte contient également le tracé des cours d'eau, des routes, chemins et sentiers et les emprises de bâtiments, tels que disponibles dans les bases de données. La visualisation de ces éléments localisés permet une vision contextualisée du site. Les routes, chemins et sentiers sont pertinents à cartographier. Ils ont une influence significative sur la faune sauvage, même si elle est ambivalente car ils sont associés à des dérangements ainsi qu'à des ouvertures du milieu facilitant les déplacements et pouvant contenir des espèces végétales intéressantes. Ces éléments sont également pertinents pour les gestionnaires car, comme les maisons forestières, ils permettent l'accès au site. Les cours d'eau peuvent attirer les animaux, notamment par la présence de certaines espèces végétales. L'hydrographie est par ailleurs corrélée à des formes du relief, tels les fonds de vallées ou parfois des pentes raides avoisinantes.

Discussion

Les résultats finaux attendus du travail étaient des cartes clairement symbolisées contenant des lieux d'intérêt des chevreuils et des cerfs. Plusieurs étapes ont été nécessaires : identifier les lieux d'intérêt particulier pour la faune, les caractériser avec des informations pertinentes relatives aux individus, à l'environnement spatial et donc aux interactions, puis les visualiser sur une carte. Ces étapes se sont appuyées sur les localisations GPS des animaux et les bases de données de description de l'espace. Elles peuvent faire l'objet de plusieurs améliorations.

L'étape d'identification des lieux d'intérêt pour la faune a utilisé une modélisation des déplacements selon la vitesse et les distances parcourues. Des comportements d'effort intensif de recherche, a priori de nourriture, ont été qualifiés par la méthode du TPP puis localisés par les polygones ZRR. L'étape de caractérisation s'est concentrée sur ces polygones. La modélisation des déplacements pourrait être enrichie par d'autres comportements associés : repos, transition (déplacement exploratoire, migration), interactions sociales. Les analyses spatiales et les tests statistiques (Mann-Whitney et khi-deux) ont mis en évidence ou confirmé certaines préférences et évitement spatiaux, qui pourraient être complétées par le test de modèles statistiques comme les modèles linéaires généralisés (Cobben *et al.*, 2009). Les bases de données pourraient être enrichies par des informations extraites directement d'images aériennes ou satellites, issues d'observation sur le terrain ou précisant certains aspects des informations déjà disponibles : densité des peuplements, nombre d'espèces végétales différentes, hauteur de la végétation, petites clairières, phénologie des peuplements, des prairies et des cultures agricoles, largeur et revêtement des routes, utilisation des bâtiments. L'espace fonctionnel correspondant aux parcelles potentiellement favorable ou non aux espèces animales est une notion complémentaire aux lieux d'intérêt observés, même s'il nécessite des estimations et des implications dans la description de l'espace, ici principalement abordée par les essences forestières et les pentes. Caractériser les lieux d'intérêt pour un ou quelques individus n'est par ailleurs qu'une entrée pour accéder au comportement d'une espèce animale, tout en y apportant des indications détaillées, localisées et contextualisées. La personnalité des animaux eux-mêmes intervient

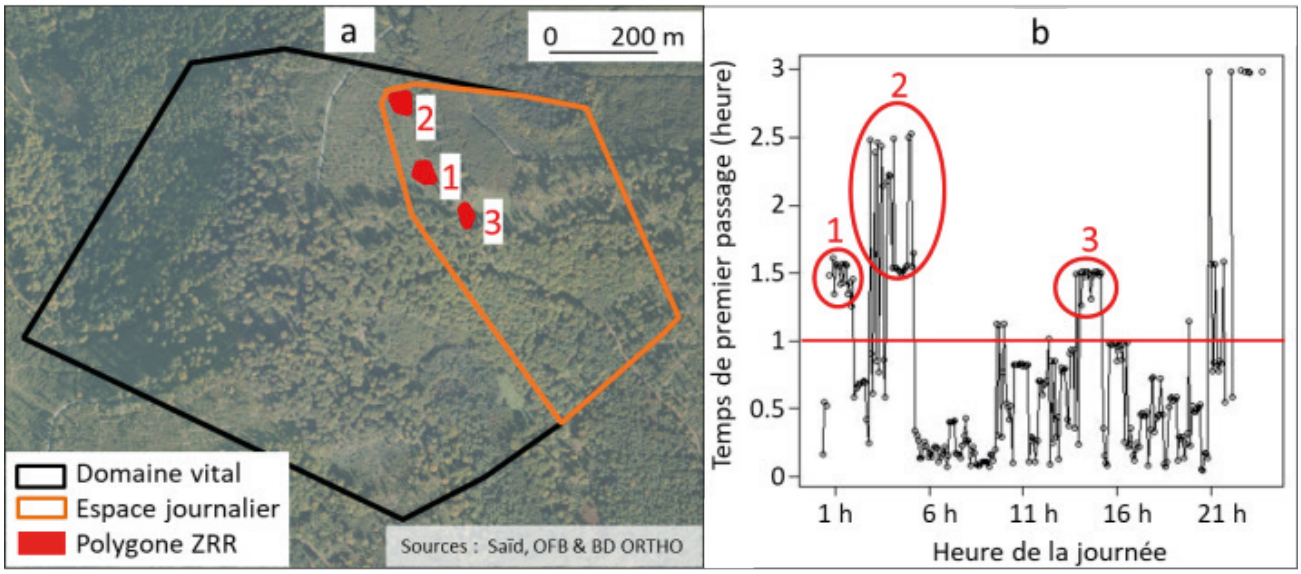

Figure 1 : Les espaces parcourus par un chevreuil :
(a) le domaine vital, l'espace utilisé pendant la journée du 3 septembre, les polygones ZRR calculés pendant cette même journée ;
(b) le graphique de la méthode TPP permettant de sélectionner les clusters ZRR de points GPS.

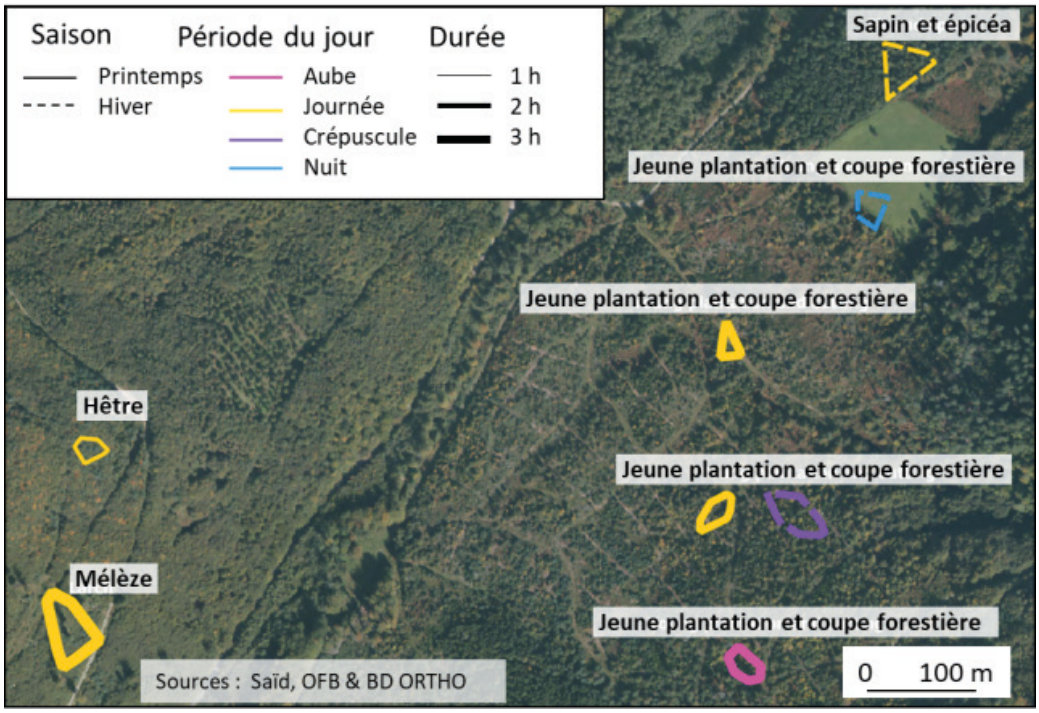

Figure 2 : Les lieux d'intérêt de recherche de nourriture d'une biche pendant trois journées : les polygones ZRR sont symbolisés à l'aide de variables visuelles associées aux attributs de caractérisation et une image aérienne est affichée en fond cartographique.

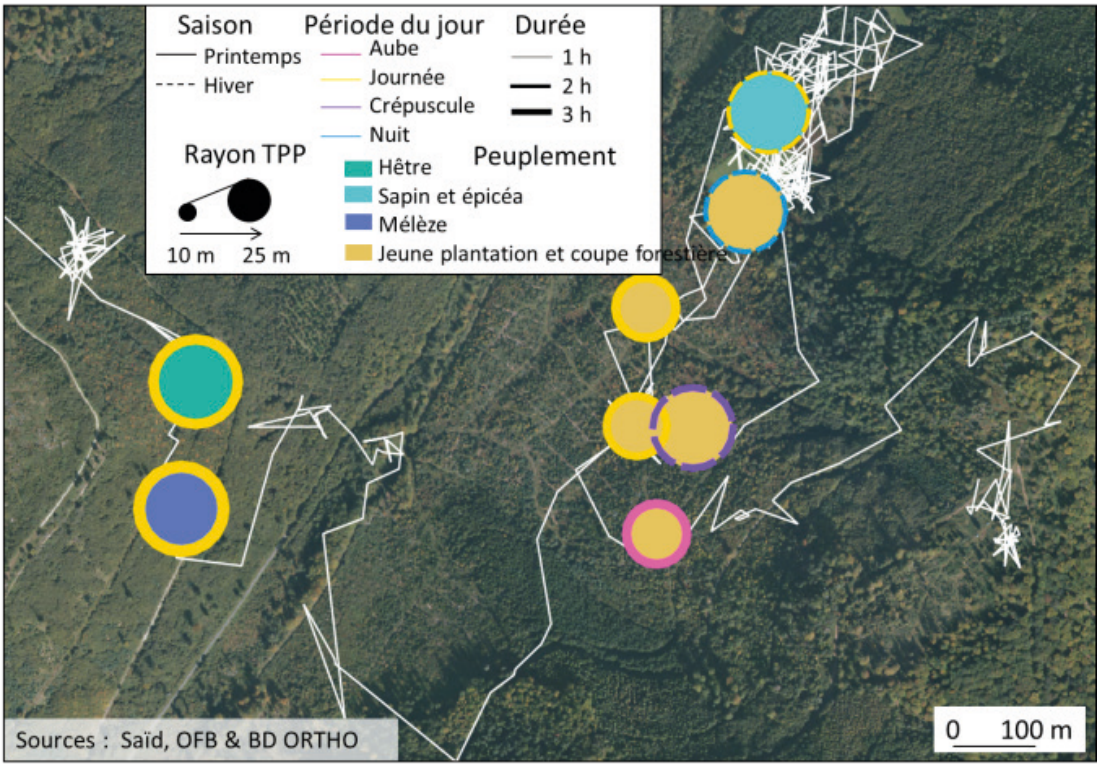

Figure 3 : Les lieux d'intérêt de recherche de nourriture d'une biche pendant trois journées (comme en figure 2) : les rayons des cercles sont proportionnels aux plus faibles rayons sélectionnés avec la méthode du TPP.

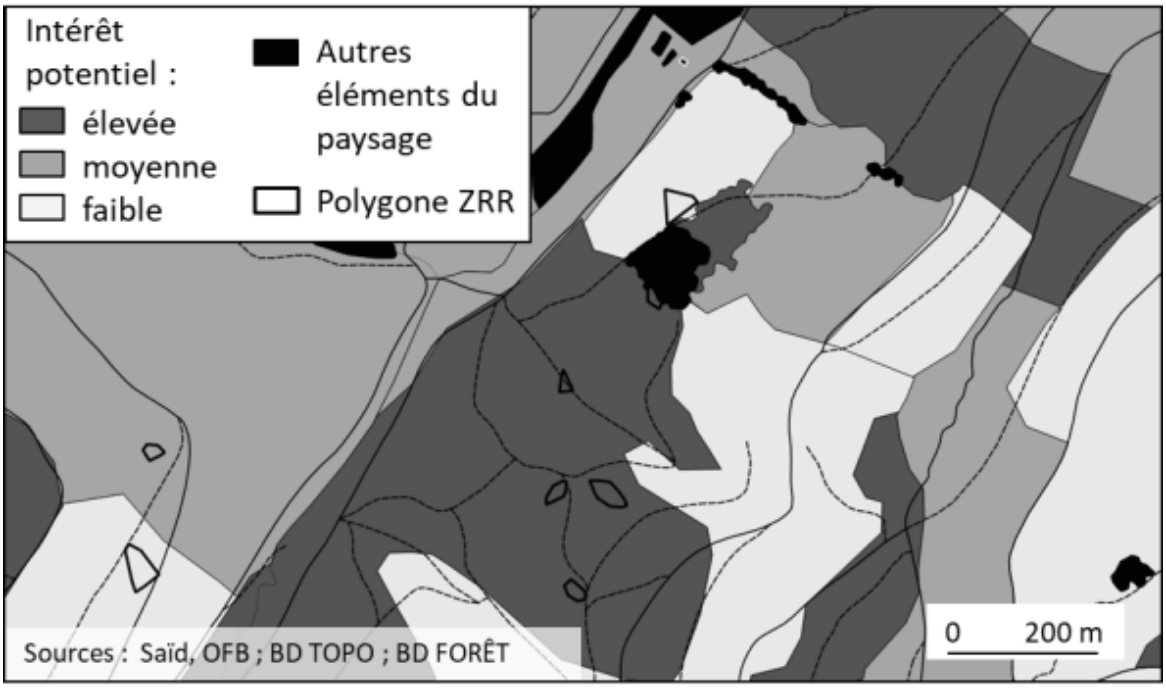

Figure 4 : L'espace fonctionnel estimé pour les cerfs, qualifié selon un gradient d'intérêt potentiel. Les parcelles correspondent aux éléments du paysage dont les peuplements forestiers.

dans la particularité des comportements individuels suivis, de même que le contexte du site et la période de l'étude. Par exemple, les cerfs sont souvent actifs à l'aube et au crépuscule et notamment dans des milieux ouverts. Toutefois, un comportement actif peut être observé en milieu de journée. Dans notre cas d'étude, la prise en compte de deux espèces animales a entraîné deux caractérisations d'un même espace. Les cerfs se déplaçant sur de plus grandes distances et des étendues plus larges que les chevreuils, ils traversent et exploitent davantage de parcelles forestières et interagissent avec davantage d'éléments du paysage. Ainsi, les niveaux de détail et les échelles des cartes sont certainement à adapter en fonction des espèces animales, plus finement que ce qui a été proposé.

L'étape de visualisation par des cartes avait pour objectif d'offrir une vision synthétique et globale des lieux d'intérêt observés et potentiels issus de résultats d'analyses. Plusieurs symbolisations ont été proposées, compatibles avec un portail géographique en ligne diffusant un panel de fonds cartographiques. Elles vérifiaient des contraintes de convention cartographique et ciblaient une représentation claire pour une utilisation en gestion forestière. Elles ont été définies pour les informations des polygones ZRR à l'aide de variables visuelles et de leurs propriétés. La carte en figure 2 se concentre sur les comportements associés aux polygones ZRR et en propose une lecture rapide. La carte en figure 3 contient tous les déplacements et affiche les rayons de recherche sélectionnés grâce à la méthode du TPP. Elle s'adresse davantage à des utilisateurs intéressés par le détail des déplacements et des résultats d'analyses. Certaines parties de la carte sont toutefois peu lisibles (par ex. dans la clairière forestière mentionnée) et l'affichage pourrait prévoir des niveaux de zoom différents (Vrotsou *et al.*, 2015). Les conflits entre les choix de symbolisation concernent potentiellement les couleurs attribuées aux peuplements forestiers et les périodes de la journée. Ces conflits sont d'autant plus probables si une carte concerne non pas une espèce animale comme c'est le cas de nos cartes d'illustration mais les deux espèces étudiées, voire davantage d'espèces animales. L'utilisation du texte est une opportunité intéressante. Si le texte est statique, cela réduit peu le nombre de variables visuelles nécessaires. S'il est dynamique et activé suite à l'action d'un utilisateur d'un portail géographique, davantage d'informations peuvent alors être écrites, réduisant le nombre de variables visuelles à définir. Les cartes de l'espace fonctionnel couvrent de manière exhaustive l'espace ainsi qualifié selon un gradient d'intérêt potentiel. Une telle visualisation permet par ailleurs de mettre en avant la présence ou l'absence de connexions spatiales entre les parcelles à intérêt élevé et de prendre en compte la fragmentation des habitats naturels.

Les perspectives du travail sont l'évaluation des cartes, puis leur enrichissement. L'évaluation concerne la lisibilité et l'intérêt en gestion forestière. Des enquêtes utilisateur peuvent être menées (Nivala *et al.*, 2008; Brewer *et al.*, 2003). L'enrichissement des cartes peut inclure une caractérisation complète des déplacements à l'aide de mesures estimées (distance, vitesse, angle relatif, étendue locale) ainsi que leur localisation par rapport aux éléments du paysage (par exemple distance aux routes, aux clairières, à la bordure de la forêt). Le milieu utilisé est principalement forestier dans le cas présenté, mais chevreuils et cerfs peuvent utiliser plus ou moins temporairement d'autres types de couverture du sol (Gottardi, 2011). Visualiser les configurations paysagères et comment les déplacements observés s'y inscrivent permet d'étudier les interactions entre éléments du paysage et entre paysage et animaux. Par ailleurs, des indicateurs de fiabilité et de représentativité des informations cartographiées pourraient être définis afin d'accompagner l'utilisateur des cartes dans sa lecture.

Conclusion

Dans cet article, les lieux d'intérêt de la faune correspondaient à des comportements de recherche de nourriture et ont été analysés grâce à des données de déplacements individuels et de description de l'espace. Ces lieux sont considérés lors de la gestion forestière, notamment s'ils sont sensibles aux pressions de prélèvement. Nous nous sommes concentrés sur une étude de cas, sur les chevreuils et les cerfs, en milieu forestier, dans un site montagneux et avec relativement peu de présence humaine. Les cartes produites contiennent des informations sur les lieux d'intérêt, symbolisées dans un objectif de lisibilité. La cartographie des lieux d'intérêt et des informations de caractérisation a mobilisé des règles cartographiques et la combinaison de variables visuelles sur des objets calculés, ici les polygones ZRR. Un des apports du travail est l'utilisation conjointe de méthodes d'analyses spatiales et statistiques afin de rendre compte et de visualiser dans un portail cartographique l'utilisation de l'espace par les animaux et leur contexte paysager et temporel.

Bibliographie

Andrienko, G., Andrienko, N., Olteanu-Raimond, A.-M., *et al.* (2012). « Towards Extracting Semantics from Movement Data by Visual Analytics Approaches ». *Proceedings of GIScience workshop GeoVisual Analytics, Time to Focus on Time*, 18 September 2012, Columbus, USA.

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*, vol. 84 (3), p. 1076-1088.

Badard, T., Braun A. (2004). « OXYGENE : d'une plate-forme ouverte pour le déploiement de services web géographiques ». *Le Monde des Cartes*, Comité Français de Cartographie, vol. 181, p. 32-41.

Bertin, J. (1967). *Sémiologie Graphique*. Gauthier-Villars/Mouton Eds., Paris.

Boulanger, V., Baltzinger, C., Saïd, S., *et al.* (2015). « Decreasing Deer Browsing Pressure Influenced Understory Vegetation Dynamics over 30 Years ». *Annals of Forest Science*, vol. 72, p. 367-378.

Brewer, C., Hatchard, G., Harrower, M. (2003). « ColorBrewer in print: a catalog of color schemes for maps ». *Cartography and Geographic Information Science*, vol. 30 (1), p. 5-32

Buard, E. (2011). « Pratiques spatiales des populations animales : analyses par les trajectoires ». *Proceedings of 10th Théo Quant*, Besançon, France, p. 10-14

Buschmann, S., Trapp, M., Döllner, J. (2014). « Real-Time Animated Visualization of Massive Air-Traffic Trajectories ». *Proceedings of the International Conference on Cyberworlds in Cantabria*, Spain, p. 174-181.

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*, vol. 24, p. 1197-1205.

Ethier, K., Fahrig, L. (2011). « Positive effects of forest fragmentation, independent of forest amount, on bat abundance in eastern Ontario, Canada ». *Landscape Ecology*, vol. 26, p. 865-876.

Etienne, L., Devogele, T., Bouju, A. (2010). « Spatio-Temporal Trajectory Analysis of Mobile Objects Following the Same Itinerary ». *Proceedings of the International Symposium on Spatial Data Handling (SDH)*, Hong Kong.

Fauchald, P., Tveraa, T. (2003). « Using First-Passage Time in Analysis of Area-Restricted Search and Habitat Selection », *Ecology*, vol. 84 (2). p. 282-288.

Forman, R. T. T., Godron, M. (1986). *Landscape Ecology*. Eds. John Wiley & Sons, 619 p.

Gottardi, E. (2011). Landscape openness effect roe deer, *Capreolus capreolus*, behavior, thèse, Université Paul Sabatier, Toulouse.

Hanley, T. (1996). « Potential role of roe deer (Cervidae) as ecological indicators of forest management ». *Forest Ecology and Management*, vol. 88, p. 199-204.

Kjellander, P., Gaillard J.-M., Hewison, A.J.M. (2006). « Density-dependent responses of fawn cohort body mass in two contrasting roe deer populations ». *Oecologia*, vol. 146 (4), p. 521-530

Le Corre, M., Pellerin, M., Pinaud, D., *et al.* (2008). « A multi-patch use of the habitat: testing the First-Passage Time analysis on roe deer paths ». *Wildlife Biology*.

Matthiopoulos, J. (2003). « The use of space by animals as a function of accessibility and preference ». *Ecological Modelling*, vol. 159 (2-3), p. 239-268.

Mysterud, A. (1999). « Seasonal migration pattern and home range of roe deer (*Capreolus capreolus*) in an altitudinal gradient in southern Norway ». *Journal of Zoology*, vol. 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*, vol. 5, p. 109-118.

Nellemann, C., Vistnes, I., Jordhoy, P., Strand, O. (2001). « Winter distribution of wild reindeer in relation to power lines, roads and resorts ». *Biological Conservation*, vol. 101, p. 351-360.

Nivala, A.M., Brewster, S., Sarjakoski, L.T. (2008). « Usability Evaluation of web Mapping Sites ». *The Cartographic Journal*, vol. 45 (2), p. 129-138.

Olsoy, P. J., Forbey, J.S., Rachlow, J. L., *et al.* (2015). « Fearscapes: Mapping functional properties of cover for prey with terrestrial LiDAR ». *BioScience*, vol. 65, p. 74-80.

Plumptre, A. J. (1993). « The effects of trampling damage by herbivores on the vegetation of the Parc National des Volcans, Rwanda ». *African Journal of Ecology*, vol. 32 (2), p. 115-129.

Rooney, T. P. (2001). « Deer impacts on forest ecosystems: a North American perspective ». *Forestry*, vol. 74 (3), p. 201-208.

Saïd, S., Gaillard, J.-M., Duncan, P., *et al.* (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, vol. 267, p. 301-308.

Spaccapietra S., Parent C., Damiani M. L., *et al.*. (2008). « A conceptual view on trajectories ». *Data Knowledge Engineering*, vol. 65 (1), p. 126-146.

Spretke, D., Janetzko, H., Mansmann, F. (2011). « Exploration through Enrichment: A Visual Analytics Approach for Animal Movement ». *Proceedings of the 19th ACM SIGSPATIAL*, Chicago and New-York, USA, p. 421-424.

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 Scientific Report*, p. 56-59.

Storms, D., Aubry, P., Hamann, J.-L., *et al.* (2008). « Seasonal variation in diet composition and similarity of sympatric red deer Cervys elaphus and roe deer Capreolus capreolus ». *Wildlife Biology*, vol. 14 (2), p. 237-250.

Vrotsou, K., Janetsko; H., Navarra, C., *et al.*. (2015). « SimpliFly : A Methodology for Simplification and Thematic Enhancement of Trajectories ». *IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics*, vol. 21, p. 107-121.

Widmer, O., Saïd, S., Miroir, J., *et al.* (2004). « The effects of hurricane Lothar on habitat use of roe deer ». *Forest Ecology and Management*, vol. 195, p. 237-242.