



Mémoire de 2<sup>ème</sup> année de Master

Spécialité Biodiversité, Ecologie, Evolution (BEE)



Parcours Biodiversité et Fonctionnement des Ecosystèmes (BIFE)

Année universitaire 2021-2022

Différences interindividuelles de prise de risque chez le chevreuil pour le franchissement des routes

LAUX Louise

Soutenu le : 22 juin 2022

Structure d'accueil : Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement (INRAE) - Comportement et Ecologie de la Faune Sauvage (CEFS)

Responsables du stage : Nadège Bonnot et Nicolas Morellet



UNIVERSITÉ DE  
MONTPELLIER

## Remerciements

Je tiens à remercier mes encadrants, Nicolas Morellet et Nadège Bonnot, pour leur aide, leurs précieux conseils, leur patience et leur disponibilité tout au long de ce stage. Je tiens également à remercier Nathan Ranc, pour avoir pris le temps de me conseiller lorsque je faisais face à mes problèmes de modèles de sélection qui ne convergeaient pas, et pour avoir tenté de m'aider à trouver une solution. Je remercie également Bruno Lourtet, pour avoir passé autant de temps à créer la couche avec les routes du parcellaire, ainsi que Yannick Chaval, pour son aide dans l'utilisation de PostgreSQL. Je ne manquerai pas de remercier tous les autres membres du CEFS, pour leur accueil chaleureux et pour m'avoir intégrée au sein du laboratoire en me permettant de développer ma culture scientifique (notamment avec les Journal Club et les séminaires auxquels nous avons pu participer). Enfin, je remercie l'équipe des stagiaires : Elsa, Maxime, Florian, Valérian, Cassie et Clara ; pour leur entraide et leur bonne humeur tout au long du stage, notamment pendant les problèmes de convergence ou les soucis sur R ; ainsi que les doctorantes Marta et Maureen.

Ce travail a bénéficié d'une aide de la Région Occitanie au titre du « défi clé BiodivOc » porté par l'Université de Montpellier. Ce stage a également été permis grâce au soutien financier du projet FRISQUE financé par la Direction à l'Appui aux Politiques Publiques (DAPP).

## Table des matières

|  |    |
|--|----|
| Introduction .....   | 2  |
| Matériel & Méthodes.....   | 5  |
| Site d'étude.....  | 5  |
| Collecte des données .....   | 6  |
| Définitions des concepts d'utilisation et de sélection de l'habitat et variables d'intérêt.....                          | 7  |
| Utilisation des trajets franchissant des routes.....   | 8  |
| Sélection des trajets franchissant des routes.....   | 8  |
| Mise en évidence des variations spatio-temporelles dans le franchissement des routes .....                               | 9  |
| Mise en évidence des variations temporelles dans le franchissement des routes .....                                      | 9  |
| Impact des variations dans la composition de l'habitat autour de la trajectoire sur le franchissement des routes.....    | 10 |
| Effets des variations de la personnalité sur la probabilité de franchissement des routes .....                           | 12 |
| Etude de la probabilité du chevreuil de mourir de collision.....   | 12 |
| Résultats .....  | 12 |
| Patrons temporels dans le franchissement des routes .....  | 13 |
| Variations saisonnières du franchissement des routes.....  | 13 |
| Variations nyctémérales du franchissement des routes .....   | 15 |
| Impact de l'habitat sur le franchissement des routes.....  | 17 |
| Effet de l'habitat environnant la step sur le franchissement de routes .....   | 17 |
| Effet de l'association entre habitats de départ et d'arrivée de chaque trajectoire sur le franchissement des routes..... | 18 |
| Effet de la personnalité sur la probabilité de franchissement des routes.....  | 20 |
| Etude de la propension à mourir de collision en lien avec le comportement de franchissement de routes .....              | 20 |
| Discussion .....   | 21 |
| Le franchissement des routes chez le chevreuil varie de manière saisonnière et journalière.....                          | 21 |
| Le franchissement des routes varie avec l'habitat local .....  | 23 |
| La personnalité ne semble pas influencer la probabilité de franchissement des routes.....                                | 24 |
| Le risque de collision semble lié à la propension à franchir des routes .....  | 24 |
| Limites et perspectives .....  | 25 |
| Références bibliographiques .....  | 27 |
| Annexes.....   | 31 |
| Résumé.....  | 34 |
| Abstract .....   | 34 |

## Introduction

Face aux besoins croissants d'une population mondiale en pleine expansion, les activités anthropiques se sont intensifiées depuis plusieurs décennies. Cet accroissement s'accompagne, entre autres, d'une augmentation de l'urbanisation, dont les impacts sur le fonctionnement des écosystèmes sont multiples (Rosa et al. 2012). Le développement des villes dans ce contexte d'urbanisation et de taux de croissance de la population humaine sans précédent se traduit par une modification forte et rapide des paysages. Cette transformation a des conséquences en cascade sur l'environnement (Grimm et al. 2008), telles que la modification des cycles biogéochimiques (notamment par la pollution de l'air, du sol, des cours d'eau et des émissions de dioxyde de carbone, Pouyat et al. 2007), l'import d'espèces invasives, des changements dans des communautés multitrophiques (Goddard et al. 2010, Barnes et al. 2017), la réduction de la richesse spécifique de certains taxa (McKinney et al. 2002), ou encore la perte ou la perturbation des habitats.

La fragmentation des habitats, par la construction d'infrastructures routières et ferroviaires, est l'une des causes majeures de l'érosion de la biodiversité (Hooke et al. 2013, Underhill et al. 1999). En premier lieu, ces infrastructures représentent une source de pollution pouvant causer des changements locaux de pH du sol, ou encore affecter la photosynthèse des végétaux environnants. Par ailleurs, les infrastructures routières peuvent être responsables de changements dans l'hydrologie locale par la libération d'hydrocarbures, affectant ainsi les communautés d'organismes aquatiques. En outre, les rafales de vent générées par le passage des véhicules (Flückiger et al. 1978) ainsi que l'augmentation du bruit constituent des perturbations pour les espèces vivant à proximité des routes. La fréquence des chants d'oiseaux vivant en bordures routières avec un niveau sonore élevé peut par exemple être modifiée, impactant par conséquent la communication aviaire (Parris et al. 2009). Ces infrastructures peuvent également agir comme repère servant à délimiter le domaine vital des animaux sauvages (Seigle-Ferrand et al. 2022) ou comme barrière physique : elles contraignent de ce fait les animaux dans leur utilisation de l'espace, et restreignent leurs mouvements. Les habitats étant fragmentés en plus petites unités et le flux génique entre groupes réduit, la vulnérabilité des populations isolées face à l'extinction se trouve accrue (Underhill et al. 1999). En outre, un autre effet majeur des routes sur la faune sauvage est la mortalité directe par collision (Spelleberg et al. 1998). Plusieurs études ont montré qu'un grand nombre de mammifères était tué quotidiennement en Europe et en Amérique, par collision sur des routes (Beben et al. 2010). En Allemagne par exemple, presque 15 000 chevreuils (*Capreolus capreolus*), 1 300 sangliers

(*Sus scrofa*) et 1 615 blaireaux européens (*Meles meles*) sont morts en 2000. La collision est même la première cause de mortalité de l'élan (*Alces alces*) dans le refuge national Kenai de la faune sauvage en Alaska (Trombulak et al. 2000), ce qui rend bien compte de l'importance de l'effet des routes sur la faune. Cette mortalité par collision constitue aussi un enjeu sociétal, représentant à la fois un coût humain et matériel (par les dommages causés aux véhicules, Lester et al. 2015).

La fréquence des collisions entre véhicules et ongulés ayant augmenté ces dernières années (par exemple en Suisse 15 000 chevreuils sont morts de collision en 1989 et 50 000 en 1993, Bruinderink et al. 1996), la compréhension du comportement de ces animaux face aux routes a suscité l'intérêt de la communauté scientifique (Meisingset et al. 2013). Plusieurs études ont été menées dans le but d'étudier la réponse comportementale de la faune sauvage à cette pression anthropique, constituant une source de stress (Carbillet et al. 2020). En effet, face à la perturbation que représente une infrastructure routière, les animaux peuvent modifier leur comportement spatial, en ajustant la surface de leur domaine vital, ou en modifiant leurs déplacements (Trombulak et al. 2000). Le fait de traverser une route représente un risque et il a été montré que les animaux minimisent leur exposition aux structures anthropiques via des comportements d'évitement du risque similaires à ceux mis en place dans l'évitement des prédateurs (Londe et al. 2021). Ainsi, une des réponses primaires adoptées par la faune sauvage face aux infrastructures routières est l'évitement des routes représentant un danger potentiel, en sélectionnant des habitats avec moins de routes.

Plusieurs études se sont ainsi intéressées à la sélection de l'habitat chez les ongulés en relation avec les infrastructures routières, dont celle de Meisingset et al. (2013), sur le cerf élaphe en Norvège. En suivant 67 adultes équipés de colliers GPS dont les données ont été analysées via un modèle de sélection de l'habitat, qui permet de comparer les habitats occupés par les animaux à ceux de localisations aléatoires, les chercheurs ont mis en évidence un comportement d'évitement des routes durant la journée. En étudiant la fréquence de franchissement des routes, ils ont aussi montré une variation saisonnière avec une fréquence de franchissement plus élevée en automne et en hiver. La fréquence de franchissement des routes semblait également dépendre de l'habitat, avec plus de franchissements à proximité des pâtures ainsi que dans les forêts. En plus de ces variations saisonnières, certaines études se sont intéressées aux variations nyctémérales dans le franchissement des routes, notamment celle de Passoni et al. (2021), portant sur le comportement des chevreuils en Europe centrale. En utilisant 95 trajectoires GPS chez six populations de chevreuils, ils ont pu mettre en évidence

un évitement des routes dans toutes les populations de chevreuils, et à tout moment de la journée.

Par ailleurs, en plus de ces patrons de franchissement des routes à l'échelle populationnelle, la prise de risque face aux infrastructures routières est aussi régie par des différences interindividuelles. Au sein des populations, les individus diffèrent aussi entre eux selon des traits de personnalité, notamment la prise de risque (Bonnot et al. 2015), et ces différences individuelles en termes de traits comportementaux varient le long de gradients comportementaux impactant leur survie et leur reproduction (Smith et al. 2008). Par exemple, le gradient timide-téméraire différencie des individus « timides », moins actifs et minimisant l'exposition au risque, et des individus « téméraires », plus actifs, et plus tolérants face au risque.

En France en 2008 et 2009, 86 777 collisions ont été reportées avec des chevreuils, cerfs élaphe et sangliers (Saint-Andrieux et al. 2020). Parmi les ongulés les plus concernés par ce risque, le chevreuil est une des espèces d'ongulés sauvages les plus répandues en Europe (Valente et al. 2014), dont il a été montré qu'elle tendait à éviter les routes (Padié et al. 2015), notamment de jour (Bonnot et al. 2013). Afin de mieux comprendre et prévenir le risque de collision, il apparaît donc pertinent de mieux comprendre les patrons de franchissement des routes chez le chevreuil (*Capreolus capreolus*), ainsi que les différences interindividuelles qu'il peut exister face à cette prise de risque. Pour cela, nous nous sommes appuyés sur les suivis GPS de 344 chevreuils équipés entre 2005 et 2020 dans une zone d'étude située au sud de Toulouse dans le canton d'Aurignac. L'objectif de nos travaux était (i) d'analyser les patrons spatio-temporels qui expliquent la probabilité de franchir des routes et (ii) d'identifier s'il existe des différences interindividuelles dans le franchissement des routes, notamment en termes de personnalité (timide vs téméraire) des individus. Pour cela, nous avons à la fois utilisé des analyses d'utilisation de l'habitat "route" (pour estimer la probabilité de franchissement des routes pour chaque individu) et des analyses de sélection de l'habitat, qui permettent d'estimer le risque relatif de chaque individu à franchir une route dans divers contextes paysagers et sachant la disponibilité environnante en routes. Cette analyse de sélection de l'habitat nous permet alors de comparer les trajets réalisés par un individu donné avec des trajets aléatoires que l'individu aurait pu emprunter.

Plus particulièrement, nous nous attendons à ce que le franchissement des routes par les chevreuils varie spatio-temporellement par exemple entre saisons, entre le jour et la nuit ou encore selon le contexte paysager local, notamment en lien avec le risque perçu par les animaux. Bien qu'étant saison-dépendant, le trafic routier est en général plus important de jour dans notre

zone d'étude, en conséquence nous prédisons une fréquence de franchissement des routes moins élevée le jour. Plus précisément, nous nous attendons à observer plus de franchissements des routes à l'aube et au crépuscule, notamment pour rejoindre des habitats d'intérêt pour le chevreuil (entre zones de refuge et d'alimentation par exemple), ces périodes correspondant au pic d'activité du chevreuil (Pagon et al. 2013 ; Bonnot et al. 2020). Nous émettons également l'hypothèse que la fréquence de franchissement des routes varie en fonction du contexte paysager et notamment de la distribution des habitats de part et d'autre de la route, avec des associations d'habitats plus propices à une prise de risque et donc au franchissement des routes pour transiter d'un habitat à l'autre. Nous pouvons par exemple nous attendre à ce qu'un changement de type d'habitat (par exemple ressources vers refuge) soit accompagné d'une plus grande probabilité de franchissement de routes. Les mâles et femelles différant dans leur comportement spatial au cours de l'année, notamment au moment de la reproduction (Malagnino et al. 2021), l'effet du sexe a été pris en compte dans nos analyses. Par ailleurs, nous prédisons des différences interindividuelles, en fonction des traits de personnalité et nous nous attendons à ce que les individus indexés comme les plus "téméraires" à la capture soient également ceux qui s'exposent le plus au risque, et donc soient ceux qui franchissent le plus la route par rapport aux autres, notamment de jour où le risque associé à la route est le plus important.

Enfin, si les individus diffèrent dans leur probabilité de franchissement des routes et tactiques spatiales, nous pouvons également nous attendre à ce que la probabilité d'entrer en collision avec un véhicule, et donc la survie, diffère aussi entre les individus. Nous nous attendons donc à observer des différences dans la prise de risques et les tactiques spatiales entre les individus qui survivent et ceux qui meurent de collision.

## Matériel & Méthodes

### Site d'étude

Le site d'étude se trouve dans le sud-ouest de la France, à 80 kilomètres de Toulouse, dans la commune d'Aurignac (N 43°17, E 0°53). Le paysage y est caractérisé par la présence de deux forêts principales ainsi que de plusieurs zones boisées, représentant au total 18.4 % de la surface de la zone d'étude. Le reste du site est essentiellement composé de prairies (31.9%), de cultures (36.2%), et de haies (5.8%, Morellet et al. 2011). Des infrastructures humaines sont également présentes dans la zone d'étude, avec notamment des fermes et des maisons isolées.

De plus, le site est traversé par un important réseau de routes et de chemins : 672 tronçons de routes bitumées, alliant routes communales, routes privées et routes départementales (*Annexe I*).

### Collecte des données

Les chevreuils de cette étude ont été capturés entre 2005 et 2020, lors des captures annuelles hivernales par la méthode de panneautage, consistant à rabattre les animaux vers des filets orientés à la verticale. Les animaux pris dans un filet ont ensuite été transférés dans une boîte de rétention en bois avec peu d'espace pour limiter le stress. La plupart des chevreuils ont été tranquilisés avec de l'acépromazine. Ils ont ensuite été équipés d'un collier GPS durant la procédure de marquage et le sexe, l'âge (catégorisé en jeunes, subadultes, adultes), ainsi que la masse corporelle de chaque individu ont été relevés avant qu'il soit relâché sur site.

Pour déterminer la personnalité des individus sur un gradient timide-téméraire, les comportements des chevreuils au filet, sur la table de marquage ainsi qu'au moment du lâcher ont été relevés afin de calculer une note comportementale pour chaque individu (Bonnot et al. 2014, Debeffe et al. 2014). Chaque individu a obtenu un score comportemental fondé sur l'occurrence (présence ou absence) ou l'intensité (nulle, modérée, forte) de sept comportements : retournement dans le sabot, se couche au lâcher, titube, course bolide, lutte filet, gratte collier et lutte halète. La note comportementale a ensuite été calculée comme la moyenne de ces scores comportementaux, variant entre 0 et 1, et a été corrigée par le nombre de recaptures, un individu pouvant être capturé plusieurs fois et faire preuve d'habitation.

Entre 2005 et 2020, 364 individus ont été équipés d'un collier GPS donnant la localisation de l'animal toutes les dix minutes pendant 24 heures une fois par mois (soit 144 mesures maximum par individu) sur une période d'environ 1 an (entre janvier-février et le début du mois de décembre). Les individus identifiés comme disperseurs ont été enlevés de l'étude. La dispersion natale représente le mouvement d'un organisme entre sa zone natale et le lieu de sa première reproduction ou le lieu où il se serait reproduit s'il avait survécu et trouvé un partenaire (Howard 1960). Pendant la phase de transience, les disperseurs se déplacent et utilisent l'habitat dans un environnement qu'ils ne connaissent pas (Ducros et al. 2020) et n'ont donc pas un comportement spatial comparable à celui des individus philopatrics. Le jeu de données final était ainsi composé de 344 individus (certains ayant été recapturés) dont 126 mâles et 218 femelles, parmi lesquels 45 jeunes (moins d'un an), 72 subadultes (entre un et deux ans) et 227 adultes (ayant plus de deux ans).



Les localisations GPS aberrantes ont été identifiées puis supprimées du jeu de données en suivant la méthode de Bjoorneras et al. (2010), soit 38 positions sur un total de 492 857 localisations. Afin d'identifier les franchissements des routes par les chevreuils, nous avons déterminé les trajectoires ou "steps" qui traversent les routes ; une trajectoire étant définie par un segment reliant deux localisations GPS consécutives séparées par un intervalle de temps de 10 minutes. Les steps ont été matérialisées par un objet spatial au format Linestring via le système de gestion de bases de données PostgreSQL. Parfois le collier GPS n'est pas en mesure de réaliser une localisation ou en raison du retrait des valeurs aberrantes, certains intervalles de temps entre deux localisations GPS étaient supérieurs à 10 min (avec une tolérance de 2 minutes pour l'acquisition du point GPS), nous n'avons donc pas généré de steps pour ces intervalles-là. Pour savoir quelles steps avaient franchi une route, des jointures spatiales ont été réalisées avec le parcellaire afin d'identifier les trajectoires ayant sectionné des routes. Une ellipse a ensuite été générée autour de chaque step afin de représenter l'incertitude sur la position réelle de l'animal entre les mesures, avec une erreur de 10 mètres (erreur sur les localisations GPS) et une excentricité de 0.95, permettant de rendre compte du fait que l'incertitude sur la trajectoire était plus élevée loin des extrémités de la trajectoire. Afin d'évaluer l'effet de l'habitat sur le franchissement des routes, nous avons également quantifié l'aire de chaque habitat composant chaque ellipse puis calculé la proportion de chaque habitat dans l'ellipse. De la même façon, nous avons identifié pour chaque localisation GPS le type d'habitat dans lequel elle se situait, afin de déterminer l'habitat de départ et d'arrivée de chaque trajectoire. La saison a été catégorisée en cinq saisons (suivant Bonnot et al. 2018) : hiver (de décembre à février, quand la disponibilité en ressources est faible et le risque de prédation pour le chevreuil élevé dû à la chasse en battue), début du printemps (mars-avril, quand les ressources sont élevées et le risque de prédation faible), printemps tardif (mai-juin, quand les ressources sont les plus élevées et les femelles en période de lactation), été (juillet à mi-septembre, juste avant le début de la chasse) et automne (mi-septembre à novembre).

### Définitions des concepts d'utilisation et de sélection de l'habitat et variables d'intérêt

Afin d'étudier les patrons spatio-temporels expliquant le franchissement des routes, et d'identifier les différences interindividuelles dans le franchissement des routes, plusieurs analyses ont été réalisées, résumées ci-dessous. Les analyses étaient faites à la fois sur l'utilisation des trajets franchissant des routes (en étudiant la probabilité de franchissement) et sur la sélection des trajets franchissant des routes, pour comparer les trajets utilisés avec des

trajets disponibles que l'individu aurait pu emprunter, donnant ainsi une information supplémentaire par rapport à l'utilisation.

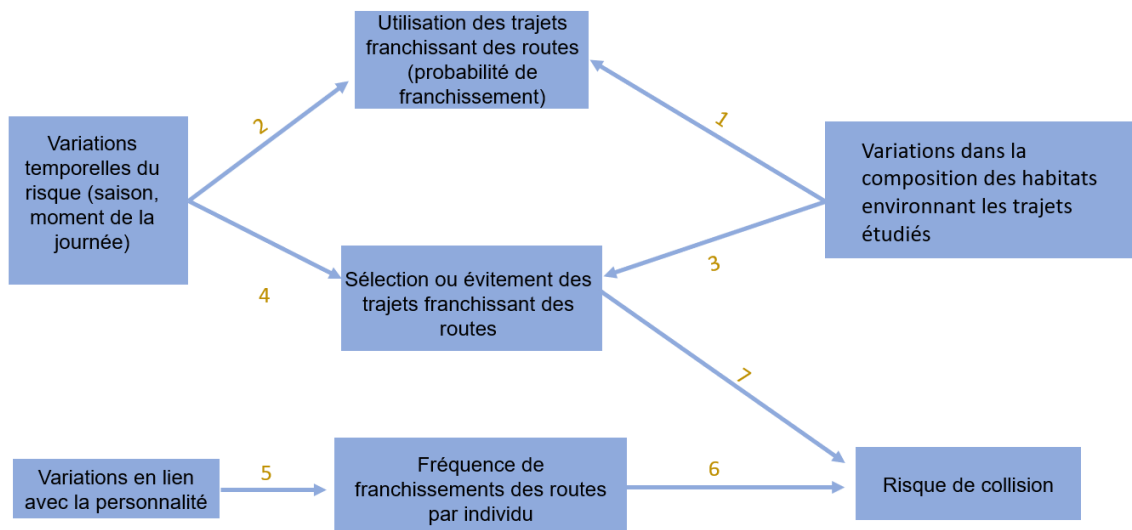


Figure 1 : Représentation schématisée des relations testées entre les différentes variables d'intérêt. Les flèches représentent les effets supposés d'une variable explicative sur une variable dépendante.

### Utilisation des trajets franchissant des routes

Pour mettre en évidence l'effet des variables spatio-temporelles (saison biologique, moment de la journée et variations dans la composition des habitats environnant les trajets étudiés) sur la probabilité de franchissement des routes, des modèles linéaires mixtes généralisés ont été utilisés avec pour variable dépendante la variable binaire "route" indiquant si un step avait franchi une route (prenant alors la valeur 1) ou non (valeur 0). Pour l'ensemble des modèles d'utilisation, l'individu était inclus en variable aléatoire sur l'ordonnée à l'origine, plusieurs mesures étant réalisées pour le même individu. La sélection de modèles a été réalisée en conservant les variables explicatives dont l'effet sur la variable dépendante était significatif (valeur  $P < 0.05$ ).

### Sélection des trajets franchissant des routes

Afin de comprendre en quoi les caractéristiques spatio-temporelles associées aux différentes trajectoires influencent le franchissement des routes, l'approche développée par Fortin et al. (2015) a été utilisée : les "Step Selection Function". Cette méthode vise à comparer les steps observées (segments liant deux positions successives d'un individu) avec des steps aléatoires et permet d'estimer si un individu tend à traverser une route plus ou moins que l'aléatoire en fonction de l'habitat disponible et des variables temporelles étudiées. Pour chaque individu et chaque step observée, dix steps aléatoires ont été générées, afin de décrire les trajets que l'individu aurait pu emprunter durant les dix minutes séparant les deux localisations GPS.

Pour définir les steps aléatoires, les longueurs et les directions d'angles ont été tirées aléatoirement au sein de la distribution des steps et des angles observés (de manière indépendante). Ainsi, les steps aléatoires et observées partageaient le même point de départ. Pour étudier la sélection des trajets franchissant des routes en fonction des variables d'intérêt, des modèles linéaires mixtes généralisés avec une distribution binomiale ont été réalisés, ayant pour variable dépendante la variable binaire prenant la valeur 1 si la step était observée et 0 si elle était aléatoire. Des effets aléatoires sur l'ordonnée à l'origine ont été inclus pour l'identité de l'individu, ainsi que pour le `stratum_id`, qui permet d'apparier une step observée à ses dix steps aléatoires correspondantes (partageant le même point de départ). Les modèles ont été simplifiés autant que possible afin d'éviter les problèmes de non-convergence. Dans chacun des modèles de sélection, les variables explicatives étaient en interaction avec la variable "route", prenant la valeur 1 si la step avait franchi une route et 0 sinon, afin d'étudier la sélection (ou l'évitement) des steps franchissant des routes en relation avec les variables d'intérêt.

## Mise en évidence des variations spatio-temporelles dans le franchissement des routes

### Mise en évidence des variations temporelles dans le franchissement des routes

#### *Variations saisonnières dans le franchissement des routes*

Dans un premier temps, des modèles additifs généralisés ont été utilisés dans le but de visualiser les patrons temporels de franchissement des routes. La variable dépendante était le fait qu'une step ait franchi une route ou non (variable binaire prenant la valeur 1 si la step en question avait franchi une route et 0 si cela n'était pas le cas). L'individu et l'année ont été inclus comme variables aléatoires sur l'ordonnée à l'origine, comme plusieurs mesures étaient réalisées pour un même individu, et plusieurs individus suivis chaque année. Pour identifier les variations saisonnières dans la probabilité de franchissement des routes, un premier modèle a été réalisé avec la date julienne en variable explicative (*Figure 1 : flèche 2*). Ce modèle a été réalisé chez les individus adultes, de manière indépendante pour les mâles et les femelles, étant donné que les tactiques spatiales diffèrent fortement entre sexes (Malagnino et al. 2021).

Pour tester statistiquement notre hypothèse selon laquelle la probabilité de franchissement des routes varierait avec la saison, et confirmer les résultats des GAMs, la variation saisonnière de la probabilité qu'un individu traverse une route a été évaluée. Un modèle linéaire mixte généralisé a ainsi été réalisé avec en variables explicatives le sexe de l'individu, en interaction avec la saison biologique (*Figure 1 : flèche 2*).

Pour déterminer si la sélection (ou l'évitement) des routes varie avec la saison, c'est-à-dire si les animaux sélectionnent plus des trajets franchissant des routes à certaines saisons de

l'année, en comparant les trajectoires utilisées avec les trajets aléatoires disponibles, un modèle linéaire mixte généralisé a aussi été utilisé. Pour cela, l'effet de la saison biologique en interaction avec le sexe a été testé sur la variable dépendante "statut de la trajectoire" (observée ou aléatoire, *Figure 1 : flèche 4*).

#### *Variations nycthémérales dans le franchissement des routes*

Comme précédemment, nous avons commencé par visualiser les variations dans la probabilité de franchissement des routes, variations quotidiennes cette fois-ci. Pour cela, nous avons réalisé un modèle additif généralisé sur les mâles et les femelles ensemble, en utilisant l'heure de la journée en variable explicative (*Figure 1 : flèche 2*). Afin de prendre en compte les changements de positions du soleil au cours des saisons, les heures ont été calculées en radians en les ajustant par rapport à l'heure de lever et de coucher de soleil. L'heure de lever du soleil a été ajustée sur  $\pi/2$  et le coucher de soleil sur  $3\pi/2$  (Nouvellet et al. 2012). Pour les graphiques, la période "aube" a été définie comme entre  $5\pi/12$  et  $7\pi/12$ , et "crépuscule" entre  $17\pi/12$  et  $19\pi/12$ , prenant en compte respectivement une heure avant et une heure après le lever du soleil et le coucher du soleil.

Pour déterminer l'effet de la période de la journée sur le franchissement des routes, des modèles d'utilisation et de sélection ont été utilisés comme précédemment (avec le sexe de l'individu en variable explicative en interaction avec la période de la journée, *Figure 1 : flèches 2 et 4*).

#### *Impact des variations dans la composition de l'habitat autour de la trajectoire sur le franchissement des routes*

Après avoir mis en évidence les variations temporelles dans le franchissement des routes, nous nous sommes intéressés à l'hypothèse selon laquelle le franchissement varierait également avec le contexte paysager. De la même manière que précédemment, nous avons raisonné à la fois en termes d'utilisation et de sélection de trajectoires franchissant des routes.

#### *Variations dans l'habitat environnant la trajectoire*

Dans un premier temps, afin d'étudier l'effet de l'habitat environnant la trajectoire sur la probabilité de franchissement des routes, *i.e.* quels types d'habitats influencent le franchissement des routes, un modèle linéaire mixte généralisé a été utilisé (*Figure 1 : flèche 1*) avec en variables explicatives la proportion de haie et de bois dans l'habitat environnant (proportions d'habitat calculées dans l'ellipse), ces variables ayant été centrées et réduites au préalable. Bien que les proportions en prairies naturelles et cultures auraient été intéressantes à considérer, étant négativement corrélées à la proportion de bois, elles n'ont pas été intégrées

dans le modèle (coefficient de corrélation de Pearson entre bois et culture et intervalle de confiance à 95% (IC<sub>95%</sub>) : -0.45.5 [-0.45.6 ; -0.45.4] P <0. 01, coefficient de corrélation de Pearson entre bois et prairie naturelle et IC<sub>95%</sub> : -0.408 [-0.409 ; -0.407], P < 0.01). Puis pour étudier l'effet de l'habitat sur la sélection (ou l'évitement) des trajets franchissant des routes, un modèle a été réalisé avec, en variables explicatives, la proportion de haie, de culture automne et de bois dans l'habitat environnant la trajectoire (*Figure 1 : flèche 3*).

#### *Variations dans les associations d'habitats entre points de départ et d'arrivée de la trajectoire*

Ensuite, après avoir étudié l'effet de l'habitat environnant la trajectoire sur la probabilité de franchissement, nous nous sommes intéressés à l'effet de l'association d'habitats entre points de départ et d'arrivée de la trajectoire sur le franchissement des routes (*Figure 1 : flèches 1 et 3*). Pour cela, afin de savoir dans un premier temps si le fait de changer d'habitat entre le début et la fin de la trajectoire influence le franchissement, une variable binaire "changement d'habitat" a été définie. Cette variable prenait la valeur 1 si les deux habitats de départ et d'arrivée d'une step étaient différents et 0 s'il s'agissait du même habitat. Cette variable a servi de variable explicative dans un modèle d'utilisation (pour voir si elle influençait la probabilité de franchissement de routes) et dans un modèle de sélection (pour voir si cela influençait l'évitement des trajets franchissant des routes).

Après cela, nous nous sommes plus particulièrement intéressés à l'association entre les habitats des points de départ et d'arrivée de chaque trajectoire, afin de déterminer si des combinaisons particulières d'habitats favorisent un franchissement. Une variable "association d'habitats" a été pour cela générée, permettant de savoir quels étaient les habitats de départ et d'arrivée de chaque step. Pour savoir quelles étaient les associations d'habitats les plus propices à influencer la probabilité de franchissement des routes, un sous-jeu de données a été créé, en se concentrant sur les changements d'habitats d'intérêt, afin d'avoir une variable changement d'habitats avec un nombre restreint de modalités : bois-culture, bois-culture automne, bois-haie, bois-prairie naturelle, haie-culture, haie-culture automne, haie-prairie naturelle, prairie naturelle-culture, prairie naturelle-culture automne. Un autre modèle mixte généralisé a été construit à partir de ce sous-jeu de données, avec cette fois-ci la variable "association d'habitats" en variable explicative factorielle (*Figure 1 : flèche 1*). Ce modèle n'a été généré que pour étudier l'utilisation des trajectoires franchissant des routes. En effet, la variable explicative avait trop de modalités pour être intégrée dans un modèle de sélection.

## Effets des variations de la personnalité sur la probabilité de franchissement des routes

Afin d'étudier si la personnalité des individus avait un effet sur la probabilité de franchir des routes (*Figure 1 : flèche 5*), nous avons dans un premier temps calculé la proportion de steps ayant franchi une route par individu. Un modèle linéaire généralisé a été ajusté sur la variable réponse "proportion de steps ayant franchi une route", suivant une distribution binomiale avec une fonction de lien logit. Les variables explicatives étaient la note comportementale en interaction avec le moment de la journée.

## Etude de la probabilité du chevreuil de mourir de collision

Pour déterminer l'effet du franchissement des routes sur la propension du chevreuil à mourir de collision avec des véhicules, une nouvelle variable binaire a été générée, prenant la valeur 1 si l'individu était mort de collision et 0 dans le cas contraire. Un modèle linéaire généralisé avec en variable réponse la variable "collision" et en variable explicative la proportion de steps ayant franchi une route pour chaque individu a été utilisé afin d'étudier l'effet de la probabilité de franchissement des routes sur la propension des individus à mourir de collision (*Figure 1 : flèche 6*).

Ensuite, afin de savoir si les individus qui sélectionnent le plus des trajets qui franchissent des routes sont ceux qui ont la plus grande propension à mourir de collision, un modèle linéaire mixte généralisé a été utilisé, comme décrit par Muff et al. (2019). Cette approche utilisée dans le cas des Resource Selection Function et Step Selection Function permet de mieux rendre compte de la variabilité interindividuelle en intégrant des pentes aléatoires. Les coefficients des pentes aléatoires par individu de ce modèle ont été extraits, donnant l'information sur la propension de chaque individu à sélectionner des routes (coefficient supérieur à 1) ou à les éviter (coefficient inférieur à 1). Un modèle linéaire généralisé a ensuite été utilisé avec en variable réponse la variable "collision" et en variable explicative le coefficient de sélection individuel pour les routes, pour savoir si les individus qui sélectionnent le plus les routes sont ceux ayant la plus grande propension à mourir de collision (*Figure 1 : flèche 7*).

## Résultats

Les résultats des modèles linéaires mixtes généralisés sont résumés dans l'annexe 2.

## Patrons temporels dans le franchissement des routes

### Variations saisonnières du franchissement des routes

La probabilité de franchissement des routes variait au cours de l'année, en fonction de la date julienne, et ce différemment selon le sexe considéré. Les probabilités variaient entre 0.008 et 0.016 pour les femelles et entre 0.015 et 0.027 pour les mâles. Chez les femelles, une diminution dans la probabilité de franchissement des routes était notamment observable au printemps, correspondant au moment de la mise bas (*Figure 2*). En effet, la probabilité de franchissement était minimale (0.008) autour de la date médiane de mise bas des femelles adultes suivies sur le site d'étude, soit le jour julien 132 (correspondant au 12 mai). Chez les mâles, le patron dans la probabilité de franchissement des routes était différent (*Figure 2*), avec un pic en début d'été (de 0.025 fin juillet), concomitant avec la date médiane du rut (le 1er août).

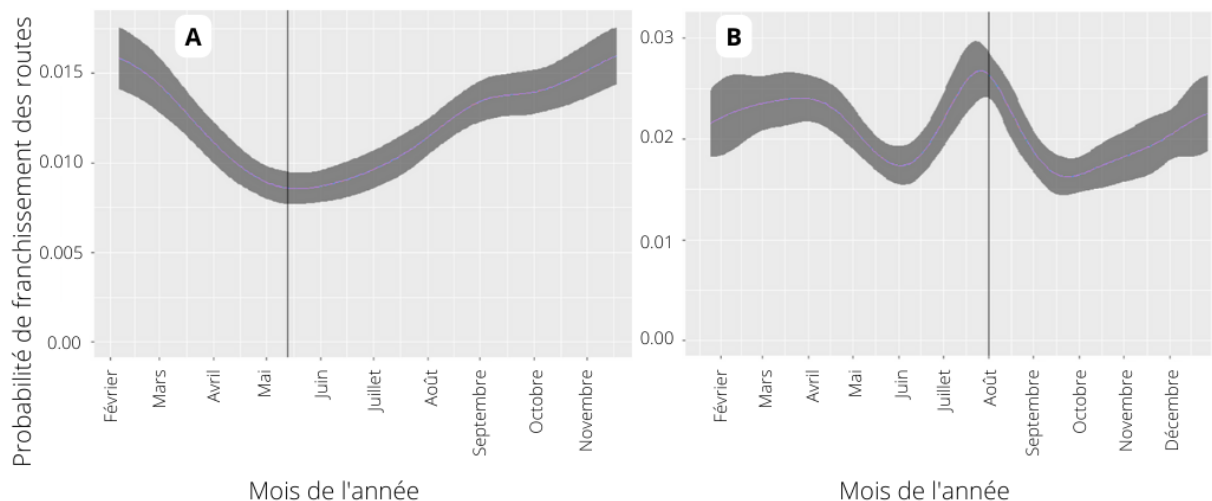


Figure 2 : Variations dans la probabilité de franchissement des routes au cours d'une année chez les femelles adultes (N= 144) (A) et chez les mâles adultes (N= 83) (B). Les barres verticales correspondent respectivement à la date médiane de mise bas (A) et à la date médiane de rut (B). L'intervalle de confiance est représenté en gris sur les deux figures.

Nos modèles d'utilisation ont montré que la probabilité de franchissement des routes variait en fonction du sexe et ce de façon différente selon la saison (interaction sexe et saison incluse dans le modèle retenu :  $\chi^2= 98$ , ddl=4,  $P < 0.05$ ). Malgré un patron saisonnier prononcé et contrasté entre les sexes, la probabilité de franchir une route pour un mâle était systématiquement supérieure à celle des femelles sur toute l'année (*Figure 3*). Les mâles avaient notamment une probabilité de franchir une route plus élevée au printemps et en été, pendant leur période de territorialité, que durant le reste de l'année. Quant aux femelles, la probabilité de franchissement diminuait entre automne et début du printemps, pour atteindre un

minimum au printemps tardif (avec une probabilité de franchissement 2 fois moins élevée au printemps tardif qu'en hiver ou automne). Les différences entre sexes étaient les plus prononcées entre le début du printemps et l'été. Au contraire, en automne et hiver, elles étaient moindres.

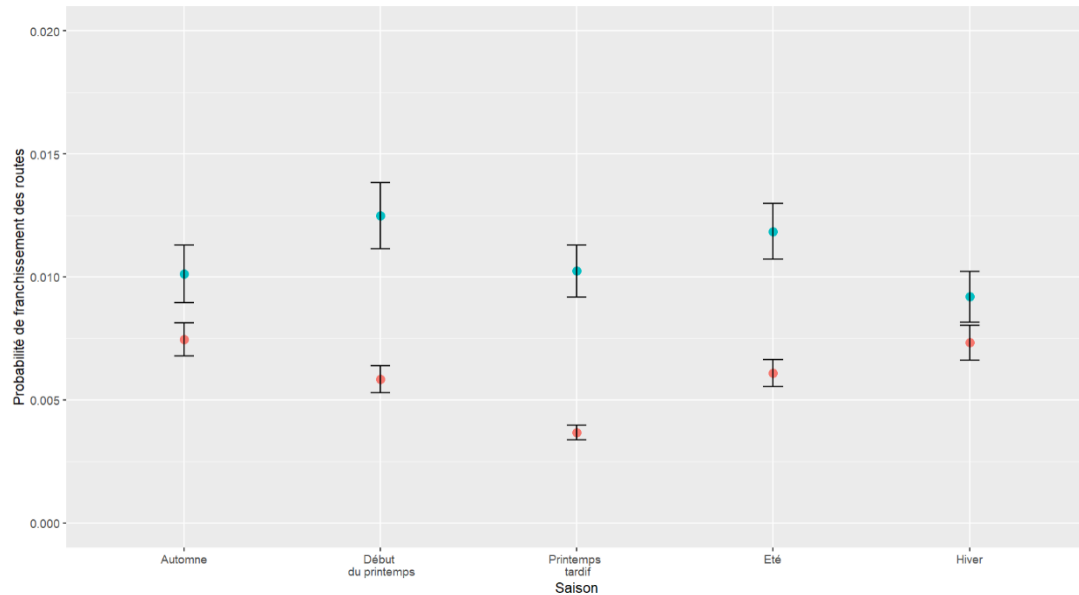


Figure 3 : Probabilité de franchissement des routes en fonction de la saison biologique et du sexe (en bleu pour les mâles et en rouge pour les femelles). Les points correspondent aux valeurs prédites par le modèle. Les erreurs standard sont représentées en noir.

Les modèles de sélection ont également montré que la saison avait un effet sur l'évitement des routes, variant selon le sexe (test GLMM,  $\chi^2=2155584$ , ddl=20,  $P < 0.05$ ), avec des patrons très différents entre mâles et femelles (Figure 4). L'évitement était plus prononcé pour les femelles au printemps tardif par rapport aux autres saisons (avec un coefficient de -2,9), et pour les mâles l'évitement était moins faible au début du printemps et en été.



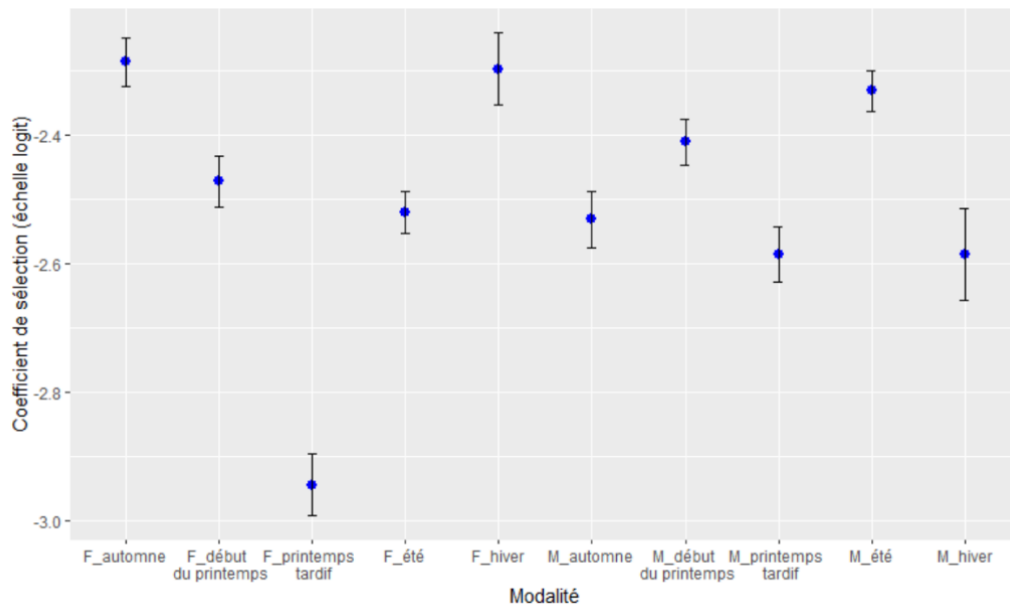


Figure 4 : Probabilité qu'une step soit observée en fonction des différentes modalités considérées (le sexe est indiqué avec la lettre F pour femelle et M pour mâle pour les différentes saisons). Les points représentent les prédictions du modèle pour les trajectoires ayant franchi des routes. Les écarts types sont représentés en noir.

#### Variations nycthémerales du franchissement des routes

La probabilité de franchissement des routes variait également au cours d'une journée (Figure 5), avec une probabilité nettement plus faible de franchir une route pendant la journée par rapport à la nuit (1,5 fois plus élevée la nuit), ou aux périodes crépusculaires (aube et crépuscule). Plus précisément, la probabilité maximale (0.025) était observée au moment du crépuscule.

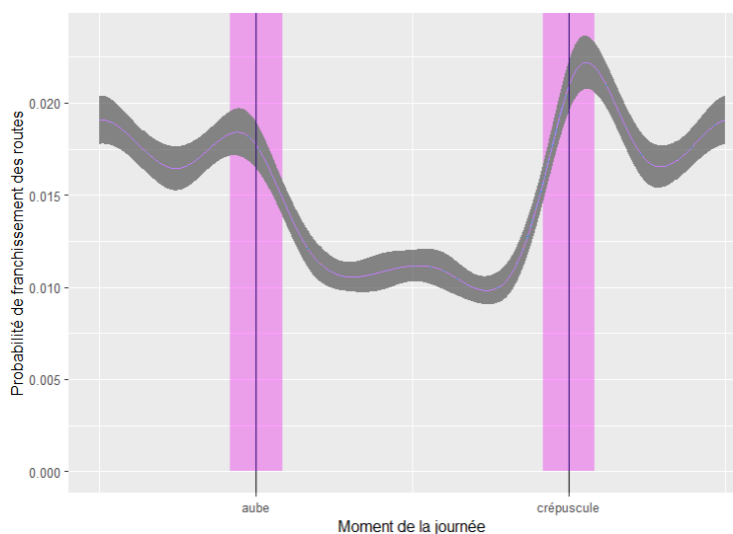


Figure 5 : Variations dans la probabilité de franchissement des routes au cours d'une journée (N= 344). L'intervalle de confiance est représenté en gris et les bandes roses représentent l'aube et le crépuscule, soient des périodes de 2h autour des heures de lever et de coucher du soleil respectivement (correspondant à  $\pi/2$  et  $3\pi/2$  en radians).

Nos modèles d'utilisation ont également montré que la probabilité de franchissement des routes variait au cours de la journée (*Figure 6*), et ce différemment selon le sexe (interaction entre le sexe et le moment de la journée incluse dans le modèle retenu :  $\chi^2=133.250$ ,  $ddl=3$ ,  $P<0.05$ ). Globalement, les mâles avaient toujours plus tendance à franchir les routes que les femelles, mais d'autant plus de nuit et aux périodes crépusculaires (avec par exemple une probabilité de franchir une route plus de 2 fois plus élevée pour les mâles par rapport aux femelles la nuit), lorsque les dérangements liés aux routes sont moindres.

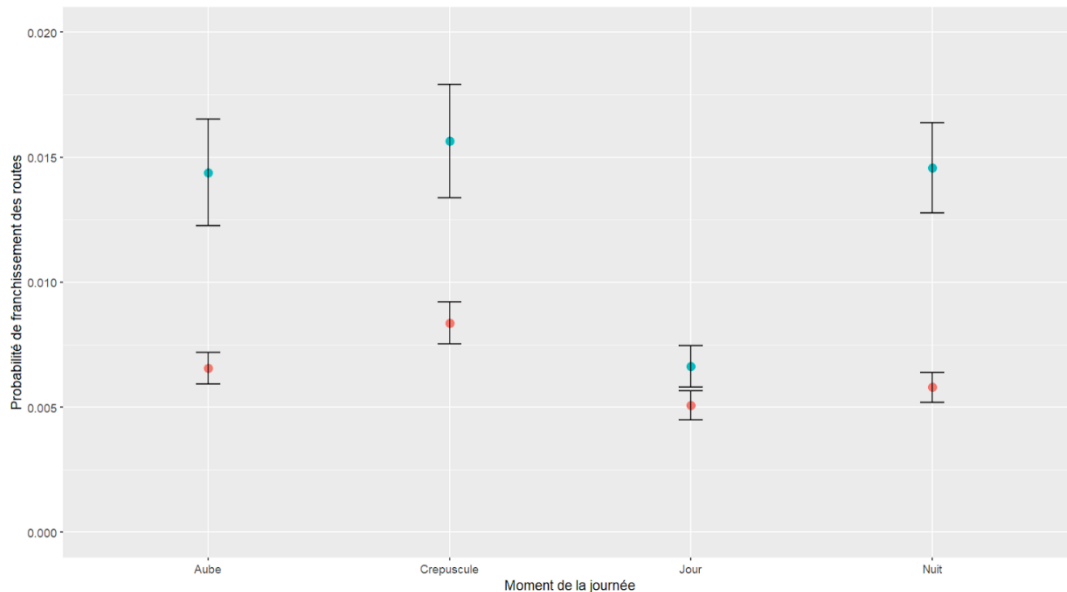


Figure 6 : Probabilité de franchissement des routes en fonction du moment de la journée et du sexe (en bleu pour les mâles et en rouge pour les femelles). Les points correspondent aux valeurs prédites par le modèle. Les erreurs standard sont représentées en noir.

Les modèles de sélection ont également montré que le moment de la journée avait un effet sur l'évitement des routes, différenciant selon le sexe (test GLMM,  $\chi^2=2140035$ ,  $ddl=16$ ,  $P < 0.05$ ). Les chevreuils évitaient les routes le jour et la nuit. Ils évitaient moins les trajets franchissant des routes au crépuscule pour les mâles comme pour les femelles (*Figure 7*, coefficients supérieurs à -2,3). Les mâles évitaient aussi davantage les routes le jour que les femelles.

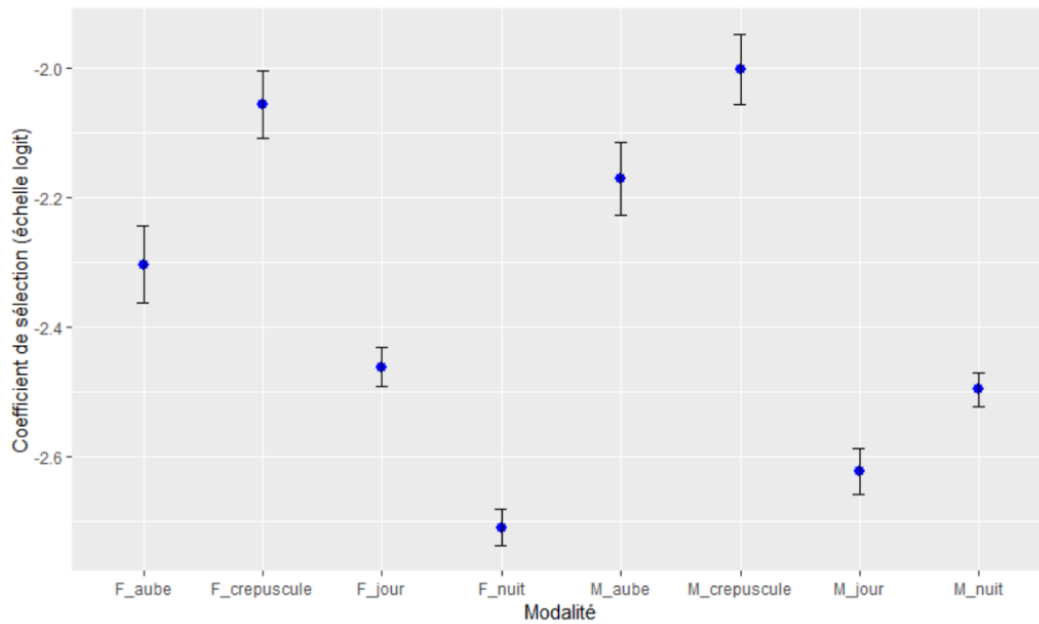


Figure 7 : Probabilité qu'une step soit observée en fonction des différentes modalités considérées (le sexe est indiqué avec la lettre F pour femelle et M pour mâle pour les différents moments de la journée). Les points représentent les prédictions du modèle pour les trajectoires ayant franchi des routes. Les écarts types sont représentés en noir.

### Impact de l'habitat sur le franchissement des routes

#### Effet de l'habitat environnant la step sur le franchissement de routes

Les trajectoires étaient entourées d'habitats dont la composition variait de 0 à 100% de haies et de 0 à 100% de bois. La probabilité de franchissement des routes diminuait avec la proportion de haies (test GLMM,  $\chi^2 = 10.9$ , ddl=1,  $P < 0.05$ ), ainsi qu'avec avec la proportion de bois dans l'habitat environnant la step (test GLMM,  $\chi^2 = 590$ , ddl=1,  $P < 0.05$ , *Figure 8*). En effet, d'après les prédictions du modèle, la probabilité de franchir une route était réduite par un facteur de 1.25 entre une trajectoire dont l'habitat environnant immédiat ne contenait absolument pas d'élément boisé par rapport à une trajectoire entourée de bois.

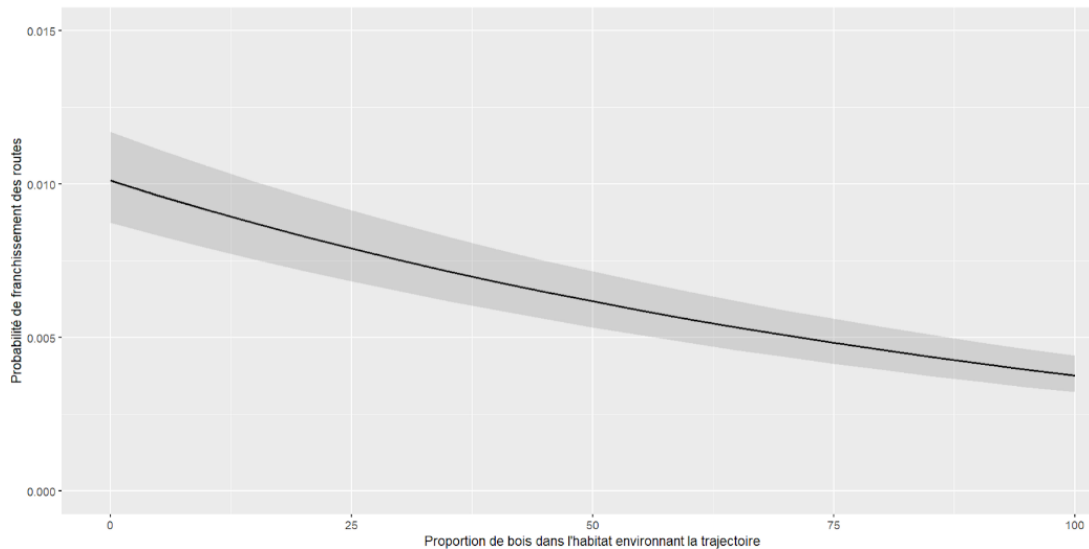


Figure 8 : Prédiction du modèle de la probabilité qu'une trajectoire franchisse une route en fonction de la proportion de bois dans l'habitat environnant la trajectoire. L'intervalle de confiance est représenté en gris.

D'autre part, les analyses de sélection ont montré que la sélection pour des trajets franchissant des routes diminuait avec la proportion de haies dans l'habitat environnant la step (test GLMM,  $\chi^2=106$ , ddl= 1,  $P < 0.05$ ). La proportion en culture automne avait l'effet inverse, avec une sélection pour les trajectoires franchissant des routes qui augmentait avec la proportion de culture automne dans l'habitat environnant la trajectoire (test GLMM,  $\chi^2=19.3$ , ddl=1,  $P < 0.05$ ). En revanche, la proportion de bois dans l'habitat environnant la trajectoire n'avait pas d'effet notable sur la sélection ou l'évitement des routes.

Effet de l'association entre habitats de départ et d'arrivée de chaque trajectoire sur le franchissement des routes

#### *Effet d'un changement d'habitat sur le franchissement des routes*

La probabilité de franchissement des routes augmentait lorsque la trajectoire changeait d'habitat entre l'habitat de départ et l'habitat d'arrivée (test GLMM,  $\chi^2=7153$ , ddl=1,  $P < 0.05$ ). Par ailleurs, les résultats du modèle de sélection montrent que les chevreuils tendent à éviter les routes par rapport à leur disponibilité, et ce quelle que soit l'association d'habitats *i.e.* coefficients de sélection inférieurs à 1/11 pour les trajectoires ayant franchi des routes (*Figure 9*). D'autre part, l'évitement pour les trajectoires franchissant des routes était moins élevé lorsqu'il y avait un changement d'habitat (test : GLMM,  $\chi^2 =24.8$ , ddl= 1,  $P < 0.05$ , *Figure 9*).

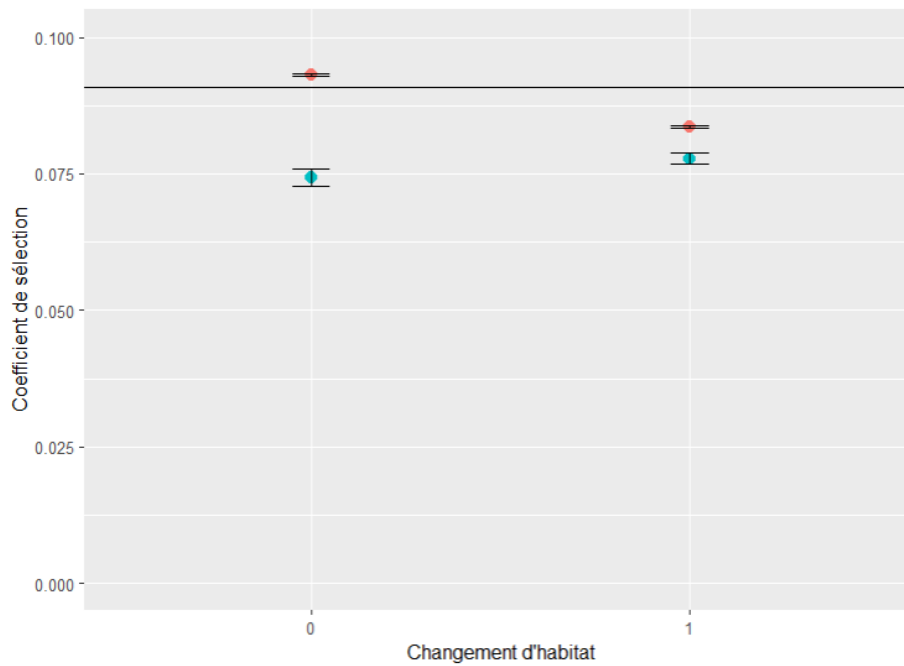


Figure 9 : Probabilité qu'une step soit observée en fonction de s'il y a eu un changement d'habitat (1) ou non (0). Les points représentent les valeurs prédites par le modèle, en bleu pour les trajectoires ayant franchi une route et en rouge pour les trajectoires n'ayant pas franchi de route. Les erreurs standard sont représentées en noir. La ligne noire horizontale correspond à la valeur seuil (de 1/11) au-dessus de laquelle les trajectoires sont sélectionnées, et en-dessous évitées.

#### *Effet de l'association d'habitats sur la probabilité de franchissement des routes*

La probabilité de franchissement des routes était impactée par l'association de types d'habitats dans lequel se situe l'animal au départ et à l'arrivée de chaque trajectoire (test GLMM,  $\chi^2 = 758.14$ , ddl= 8,  $P < 0.05$ ). En effet, certaines associations d'habitats s'avéraient plus propices à un franchissement de routes, notamment l'association bois-haie qui était celle pour laquelle la probabilité de franchissement était la plus élevée (avec une probabilité presque 4 fois supérieure à celle de l'association haie-culture par exemple, *Figure 10*).

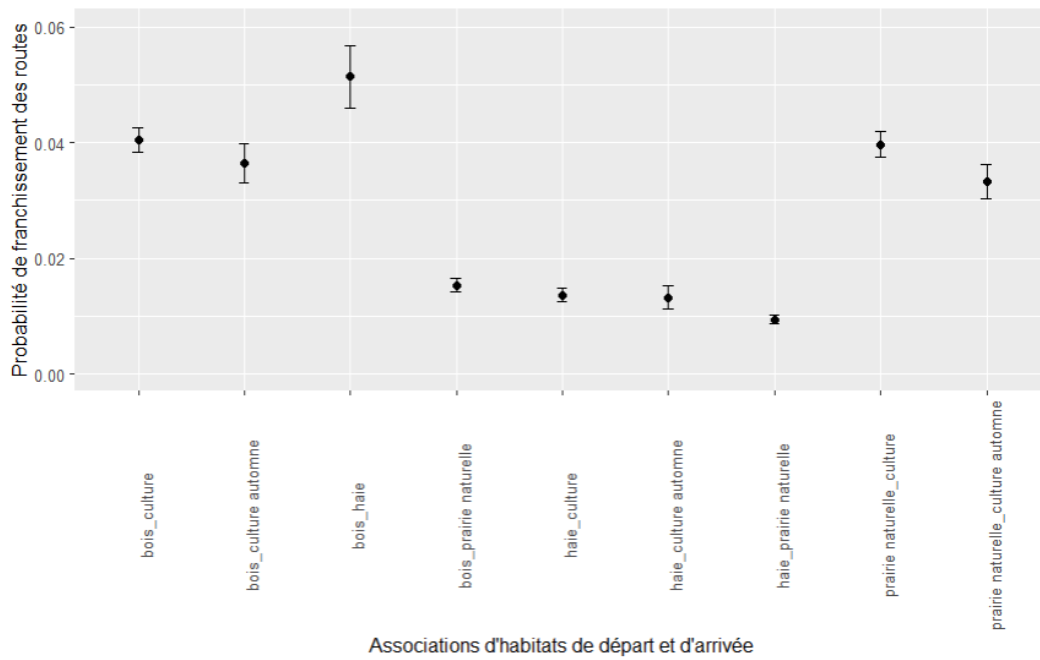


Figure 10 : Probabilité de franchissement des routes en fonction de l'association d'habitats aux extrémités de chaque trajectoire. Les points correspondent aux valeurs prédites par le modèle et les erreurs standard sont représentées en noir.

### Effet de la personnalité sur la probabilité de franchissement des routes

La note comportementale a été calculée pour 209 individus. Les probabilités de franchissement des routes variaient entre 0 et 0.08, et les notes entre -0.15 et 0.34. La note comportementale n'avait pas d'effet notable sur la probabilité de franchissement des routes peu importe le moment de la journée (interaction entre la note et le moment de la journée : test : GLMM,  $\chi^2 = 0.2$ , ddl = 1, P = 0.999).

### Etude de la propension à mourir de collision en lien avec le comportement de franchissement de routes

Sur nos 344 individus, 111 sont morts dont 14 de collision. La proportion de steps ayant franchi une route par individu n'avait pas d'effet notable sur la propension à mourir de collision (test GLM :  $\chi^2 = 0.6$ , ddl = 1, P = 0.3, *Annexe 3*). Le coefficient de sélection individuel pour les routes n'avait pas d'effet notable sur la propension à mourir de collision (test GLM :  $\chi^2 = 0.38$ , ddl = 1, P = 0.7, *Figure 11*). Toutefois la probabilité de mourir de collision avait tendance à augmenter avec le coefficient de sélection (la probabilité de mourir de collision doublant entre

les individus qui évitent le plus versus les individus qui évitent le moins, passant de 0.024 à 0.055).

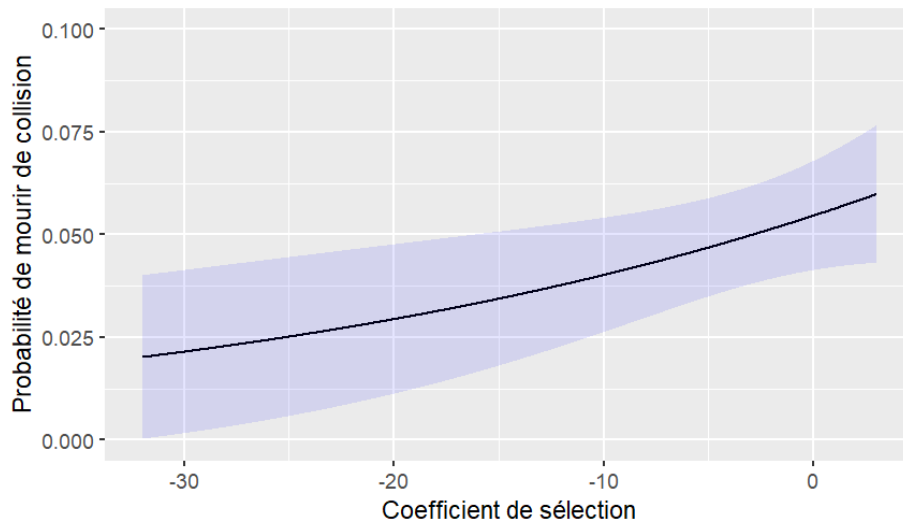


Figure 11 : Prédiction du modèle de la probabilité de mourir de collision en fonction du coefficient de sélection individuel pour les trajets franchissant des routes. L'erreur standard est représentée en mauve.

## Discussion

La fréquence des collisions entre véhicules et ongulés ayant augmenté ces dernières années, comprendre le comportement de la faune sauvage face au risque représenté par ces infrastructures routières est un enjeu majeur de la recherche actuelle en conservation de la faune sauvage. Dans ce contexte, notre étude présentait l'avantage de pouvoir étudier de manière détaillée (avec une résolution à 10 minutes) les déplacements de plus de 300 chevreuils. Nos travaux ont permis de mettre en avant des variations saisonnières et nyctémérales dans la probabilité de franchissement des routes. L'habitat environnant influence aussi le franchissement des routes, avec notamment un effet marqué de la présence des haies qui sont associées à une diminution du franchissement. Nos résultats suggèrent également que la personnalité individuelle n'a pas d'effet notable sur le franchissement. Par ailleurs, un effet biologique du franchissement des routes sur la probabilité de mourir de collision a été montré.

### Le franchissement des routes chez le chevreuil varie de manière saisonnière et journalière

Notre étude a révélé des patrons temporels marqués en termes de probabilité de franchissement des routes, à la fois saisonniers et journaliers. Concernant les variations journalières, nos résultats ont montré une probabilité de franchissement bien moindre durant la

journée par rapport à la nuit et aux périodes crépusculaires (aube et crépuscule), où un pic est observable, notamment au crépuscule (*Figures 5 et 6*). Cela est très cohérent avec les variations nyctémérales des niveaux d'activité du chevreuil qui présentent généralement des patrons d'activité journaliers bimodaux, *i.e.* avec des pics marqués à l'aube et au crépuscule (Pagon et al. 2013 ; Bonnot et al. 2020). Par ailleurs, dans notre étude, les mâles avaient une plus forte probabilité de franchissement des routes que les femelles le jour, alors qu'ils évitaient plus les routes le jour. Cela nous montre les apports de l'analyse de sélection des trajets franchissant des routes par rapport à l'utilisation de l'habitat. Cela signifie que les mâles doivent être plus proches des routes de manière générale (avec plus de routes dans leur domaine vital).

Nos résultats ont également montré des variations saisonnières sexe-dépendantes, avec des différences entre sexes s'amenuisant en automne et en hiver. Ces observations sont cohérentes avec les variations observées dans les niveaux d'activité du chevreuil au cours de l'année. L'étude de Pagon et al. (2013) avait notamment montré que les mâles étaient plus actifs que les femelles au printemps et en été, et que les différences d'activité entre sexes n'étaient pas significatives en automne et en hiver. En effet, de mars à septembre les mâles sont territoriaux et les individus sont séparés, alors qu'en-dehors de cette période ils peuvent se regrouper, expliquant en partie cette diminution des différences entre sexes en automne et en hiver. L'augmentation dans la probabilité de franchissement des routes chez les mâles en été (*Figures 2B et 3*) peut être associée au comportement de reproduction (rut). En effet, les mâles sont connus pour être très actifs à cette période de l'année (Malagnino et al. 2021), et moins prudents car obnubilés par la recherche de partenaires sexuelles. Les mâles devant à la fois établir et défendre un territoire tout en recherchant des partenaires sexuelles potentielles, cela peut expliquer la plus forte fréquence de franchissement des routes observée en été. La forte diminution observée dans le franchissement des routes des femelles au printemps coïncide avec la période de mise bas, l'allaitement et les soins postnataux alloués aux faons. En effet, à cette période de l'année les mouvements des femelles sont fortement réduits (Malagnino et al. 2021).

Par ailleurs, dans la présente étude, les mâles avaient une probabilité de franchir les routes plus élevée que les femelles et ce quelle que soit la saison. Cela ne corrobore cependant pas les résultats d'études précédentes chez d'autres cervidés selon lesquelles les femelles cerf élaphe (*Cervus elaphus*) franchissent plus la route que les mâles (Meisingset et al. 2013), les auteurs mettant ce résultat en parallèle avec l'étude de St Clair et al. (2008), qui avait montré que les mâles allouent plus de temps au comportement de vigilance à proximité des routes que les femelles, pouvant expliquer une perception du risque plus élevée et ainsi moins de franchissements. Chez le wapiti (*Cervus canadensis*), il a également été montré que les mâles



évitent davantage les zones à proximité des routes (Corquodale et al. 2013). Il est donc surprenant que nous observions des résultats opposés, et il serait intéressant d’approfondir cet aspect, bien que cela doive provenir des différences d’espèces et de lieux (l’étude de Meisingset et al. a eu lieu en Norvège, avec un climat différent).

### Le franchissement des routes varie avec l’habitat local

Nos résultats ont montré que plus l’habitat local était riche en haies et bois, moins les individus tendaient à franchir une route (*i.e.* la probabilité de franchissement des routes était plus faible). De plus, la plupart des chevreuils tendent à éviter les routes (*Figure 11*, coefficients  $<1$ ). Ces observations sont cohérentes avec plusieurs études précédentes (Padié et al. 2015, Martin et al. 2018), montrant un évitement des routes. Nos analyses de sélection des trajets franchissant des routes ont révélé que les chevreuils évitent les trajectoires franchissant des routes quand celles-ci sont dans des milieux riches en haies. Cette observation est cohérente avec notre résultat concernant la probabilité de franchissement des routes. L’étude de Meisingset et al. (2013) avait mis en évidence que le cerf élaphe sélectionne des trajets franchissant des routes dans les milieux forestiers, à proximité des pâtures, suggérant que les franchissements ont plus tendance à avoir lieu dans les milieux boisés. Cela ne coïncide pas avec notre résultat sur la probabilité de franchissement des routes en fonction de la proportion de bois dans l’habitat local. En revanche, notre modèle de sélection n’a pas montré d’effet notable de la proportion de bois sur la sélection ou l’évitement des trajets franchissant des routes. Cela suggère qu’il y a moins de trajets aléatoires franchissant les routes dans les environnements boisés dans notre étude. Le chevreuil ne semble donc pas tellement tenir compte de la présence des routes dans ses déplacements.

Par ailleurs, l’évitement pour les trajectoires franchissant des routes semblait aussi différer en fonction des habitats de départ et d’arrivée des trajectoires considérées. D’une part, la probabilité de franchir une route était plus faible dans le cas où les points de départ et d’arrivée d’une trajectoire étaient situés dans le même type d’habitat. Cela suggère que le franchissement des routes est plus susceptible de se produire lorsque les animaux cherchent à changer de types d’habitats. Sachant que le chevreuil est un animal de lisière, qui transite entre plusieurs habitats, il semblerait donc que, lorsqu’il réalise ces transitions il soit plus enclin à sélectionner des trajets avec des routes. Ces transitions entre habitats peuvent être expliquées par le concept de “complémentation du paysage” (Dunning et al. 1992, Morellet et al. 2011). Ce concept stipule que si un paysage est composé de différents types de patches, et qu’une espèce a besoin d’au moins deux types d’habitats pour survivre, par exemple si un patch constitue un

abri et qu'un autre contient des ressources alimentaires, un organisme de cette espèce sera amené à transiter entre ces différents patchs pour subvenir à ses besoins. La zone d'Aurignac, étant un paysage agricole présentant une forte hétérogénéité spatiale consistant en une mosaïque d'habitats, nous nous attendons à observer des changements d'habitats. D'autre part, d'après le concept de supplémentation du paysage, un organisme augmente sa prise de ressources en prenant des ressources dans des patchs proches les uns des autres contenant le même type d'habitat ou des habitats différents (Morellet et al. 2011). Ainsi, dans notre étude, les chevreuils ont une probabilité plus élevée de franchir des routes pour se déplacer entre les habitats haie et bois. Ces transitions entre ces deux milieux pourraient s'expliquer par ce concept, puisque les 2 patchs sont des habitats de type refuges (*Figure 10*).

### La personnalité ne semble pas influencer la probabilité de franchissement des routes

La mesure de témérité que nous avons utilisée avait déjà été corrélée de manière significative avec l'utilisation du milieu ouvert (Bonnot et al. 2013), la propension à disperser (Debeffe et al. 2014) et le succès reproducteur (Monestier et al. 2015). Nous nous attendions à ce que les individus indexés comme les plus "téméraires", avec la note comportementale à la capture la plus élevée, soient ceux ayant la plus grande propension à franchir une route. Néanmoins, nos résultats n'ont montré aucun effet notable de la note comportementale à la capture sur la probabilité de franchissement des routes, et ce quel que soit le moment de la journée, suggérant que les individus indexés comme téméraires ne tendent pas à plus franchir les routes que des individus plus timides. Afin d'affiner ce résultat, il serait intéressant de considérer d'autres mesures indicatrices de la prise de risque. Par exemple, nous pourrions considérer la distance de fuite, *i.e.* la distance à laquelle un individu prend la décision de s'enfuir face à une menace approchante, par exemple un humain (Bonnot et al. 2015 ; Bonnot et al. 2017). Si la distance de fuite s'avère être un trait de personnalité (*i.e.* répétable dans le temps et entre les contextes), nous pourrions nous attendre à ce que les individus qui tendent à avoir des distances de fuite réduites (*i.e.* ceux qui attendent plus longtemps avant de prendre la décision de fuir) soient également les plus prônes à s'exposer au risque de franchir des routes.

### Le risque de collision semble lié à la propension à franchir des routes

Bien que nos modèles ne nous permettent pas de conclure au sujet de l'effet de la sélection des trajectoires franchissant des routes sur le risque de collision, nous pouvons observer une tendance. En effet, la probabilité de mourir de collision est 2 fois plus élevée pour les individus qui tendent à sélectionner les franchissements des routes par rapport à ceux qui les évitent (*Figure 11*).

Par ailleurs, dans notre étude les mâles s'exposant plus au risque de collision en franchissant davantage les routes que les femelles, nous pourrions nous attendre à ce qu'ils soient plus prompts à mourir de collision. L'étude de Bruinderink et al. (1996) a d'ailleurs révélé que chez le cerf élaphe adulte, les mâles étaient plus vulnérables au risque de collision que les femelles, avec un sexe ratio de 2. Néanmoins, il a été montré que ce n'était pas le cas chez le chevreuil, le sexe ratio des collisions reflétant le sexe ratio dans la population (Feldhamer et al. 1986 ; Bruinderink et al. 1996). Chez le cerf muet (*Odocoileus hemionus*), il a aussi été montré que les cerfs femelles étaient plus vulnérables au risque de collision que les mâles, mais cela était lié à leur proportion importante dans la population (Olson et al. 2014). L'étude de Compare et al. (2007), sur les collisions chez le chevreuil dans les Alpes italiennes a mis en évidence le fait que le sexe-ratio des collisions chez le chevreuil varie en fonction du paysage et du climat. A Aurignac, le sexe-ratio est déséquilibré chez les adultes (sexe-ratio mâles : femelles = 0.61) du fait de la chasse en été des brocards. Ainsi, autant de femelles que de mâles tués par collision signifierait une plus grande probabilité de mourir de collision pour les mâles, étant moins nombreux dans la population. Il serait donc intéressant de mener une étude avec une population plus importante pour étudier le sexe-ratio de chevreuils morts de collision et le comparer avec le sexe-ratio populationnel pour vérifier le risque de collision plus élevé chez les mâles.

Par ailleurs, l'étude de Laliberté et al. (2020) sur l'orignal (*Alces americanus*) et le cerf de Virginie (*Odocoileus virginianus*) a montré que les collisions entre véhicules et cervidés avaient plus tendance à avoir lieu aux pics d'activité de ces animaux, *i.e.* à l'aube et au crépuscule. Nos résultats ont également montré que les chevreuils franchissent davantage les routes à ces mêmes périodes. Il serait donc intéressant d'étudier les patrons temporels dans la probabilité de mourir de collision, pour voir si nous retrouvons également une probabilité de mourir plus élevée chez le chevreuil aux périodes crépusculaires.

Toutefois, il est important de souligner que notre jeu de données était limité, composé uniquement de 14 individus morts de collision sur un total de 344 individus, conduisant à une faible puissance statistique du modèle. Par ailleurs, le jeu de données peut contenir des individus qui ont survécu mais qui risquent fort de mourir par la suite, et inversement des individus qui n'ont juste pas eu de "chance", introduisant ainsi du bruit dans les données.

### Limites et perspectives

Bien que nos modèles nous aient permis d'obtenir plusieurs résultats intéressants, nous nous sommes heurtés à des difficultés analytiques, avec notamment des problèmes de non-

convergence de modèles. En effet, l'objectif premier était d'utiliser la méthode de Muff et al. (2020) qui permet de mieux rendre compte de la variabilité interindividuelle, en ajoutant des pentes aléatoires individuelles sur les différentes variables explicatives d'intérêt. Initialement, il était donc prévu de réaliser des modèles incluant une pente aléatoire pour la proportion de chaque habitat par individu, afin de considérer la variabilité interindividuelle dans la sélection de l'habitat. Malheureusement, les modèles ne convergeaient pas malgré de nombreuses tentatives pour pallier ce problème (en changeant l'optimiseur, en modifiant les variables d'après les conseils de Stéphanie Muff etc.). De la même façon, nous avons rencontré des problèmes de convergence pour des modèles sans pente aléatoire mais tout de même complexes (incluant des interactions multiples). Plusieurs interactions pertinentes d'un point de vue biologique n'ont ainsi pas pu être testées. Une des perspectives du stage serait donc de résoudre cette difficulté méthodologique pour pouvoir ajuster ces modèles intégrant les pentes aléatoires.

D'autre part, nos résultats s'inscrivent dans une dynamique de compréhension du comportement de la faune sauvage. Il s'agit en effet de mieux comprendre le comportement des chevreuils face aux routes afin de prendre les mesures adéquates pour diminuer le risque de collision entre des véhicules et ces ongulés. La mise en évidence des patrons temporels de franchissement des routes peut être utilisée pour prédire et anticiper les périodes les plus à risque, et il serait intéressant de les prendre en compte dans la gestion des infrastructures routières en régulant la circulation en fonction de ces résultats et en informant les automobilistes (par des panneaux de signalisation par exemple). Nos travaux sur le site d'étude d'Aurignac, qui représente une zone rurale typique avec des réseaux routiers secondaires fortement utilisés, semblent montrer des franchissements plus fréquents des routes par les chevreuils aux périodes crépusculaires, ainsi qu'en automne-hiver (voire également vers mi-août pour les mâles). La poursuite de ces travaux et l'identification plus fine des individus s'exposant davantage au risque que représentent les routes permettraient également de mieux gérer le risque de collision.

Enfin, notre étude a permis d'identifier l'effet des variations dans l'habitat local entourant les trajectoires du chevreuil sur le franchissement des routes. Il serait intéressant de croiser nos résultats avec des données sur la fréquentation des routes dans la zone d'étude et des collisions réelles recensées, pour identifier précisément les tronçons de routes plus "à risque" afin de cibler ces derniers dans une optique de gestion du risque de collision. Cela permettrait d'adapter les mesures de prévention en conséquence, le risque de collision dépendant aussi grandement de la fréquentation des routes par les automobilistes, ainsi que des mesures mises en place pour réduire ce risque. Plusieurs études se sont d'ailleurs penchées sur les mesures visant à limiter le risque de collision, et plusieurs pourraient être efficaces, comme

les panneaux de signalisation, barrières ou clôtures (Huijser et al. 2009). La mise en place de zones où la vitesse de circulation est limitée, l'augmentation de l'éclairage, et des clôtures en forme de V pour que l'animal soit éloigné sont également des mesures qui permettraient de réduire le nombre de collisions (Clevenger et al. 2001). Les passerelles pour animaux sauvages, ponts recouverts de végétation pour permettre aux animaux de passer semblent aussi prometteuses, mais leur efficacité dépend de leur localisation, d'où la nécessité d'identifier les tronçons les plus à risque (Mastro et al. 2008).

## Références bibliographiques

- BARNES, Andrew D., ALLEN, Kara, KREFT, Holger, *et al.* Direct and cascading impacts of tropical land-use change on multi-trophic biodiversity. *Nature ecology & evolution*, 2017, vol. 1, no 10, p. 1511-1519.
- BEBEN, Damian. Crossings for animals—an effective method of wild fauna conservation. *Journal of environmental engineering and landscape management*, 2012, vol. 20, no 1, p. 86-96.
- BJØRNERAAS, Kari, VAN MOORTER, Bram, ROLANDSEN, Christer Moe, *et al.* Screening global positioning system location data for errors using animal movement characteristics. *The Journal of Wildlife Management*, 2010, vol. 74, no 6, p. 1361-1366.
- BONNOT, Nadège, MORELLET, Nicolas, VERHEYDEN, Hélène, *et al.* Habitat use under predation risk: hunting, roads and human dwellings influence the spatial behaviour of roe deer. *European journal of wildlife research*, 2013, vol. 59, no 2, p. 185-193.
- BONNOT, Nadège, VERHEYDEN, Hélène, BLANCHARD, Pierrick, *et al.* Interindividual variability in habitat use: evidence for a risk management syndrome in roe deer?. *Behavioral Ecology*, 2015, vol. 26, no 1, p. 105-114.
- BONNOT, Nadege C., HEWISON, AJ Mark, MORELLET, Nicolas, *et al.* Stick or twist: roe deer adjust their flight behaviour to the perceived trade-off between risk and reward. *Animal behaviour*, 2017, vol. 124, p. 35-46.
- BONNOT, Nadège C., BERGVALL, Ulrika A., JARNEMO, Anders, *et al.* Who's afraid of the big bad wolf? Variation in the stress response among personalities and populations in a large wild herbivore. *Oecologia*, 2018, vol. 188, no 1, p. 85-95.
- BONNOT, Nadège C., GOULARD, Michel, HEWISON, AJ Mark, *et al.* Boldness-mediated habitat use tactics and reproductive success in a wild large herbivore. *Animal Behaviour*, 2018, vol. 145, p. 107-115.
- BONNOT, Nadège C., COURIOT, Ophélie, BERGER, Anne, *et al.* Fear of the dark? Contrasting impacts of humans versus lynx on diel activity of roe deer across Europe. *Journal of Animal Ecology*, 2020, vol. 89, no 1, p. 132-145.
- BRUINDERINK, GWTA Groot et HAZEBROEK, E. Ungulate traffic collisions in Europe. *Conservation biology*, 1996, vol. 10, no 4, p. 1059-1067.

- CARBILLET, Jeffrey, REY, Benjamin, PALME, Rupert, *et al.* Under cover of the night: Context-dependency of anthropogenic disturbance on stress levels of wild roe deer *Capreolus capreolus*. *Conservation physiology*, 2020, vol. 8, no 1, p. coaa086.
- CLEVENGER, Anthony P., CHRUSZCZ, Bryan, et GUNSON, Kari E. Highway mitigation fencing reduces wildlife-vehicle collisions. *Wildlife Society Bulletin*, 2001, p. 646-653.
- DAL COMPARE, L., STURARO, E., COCCA, G., *et al.* An analysis of roe deer (*Capreolus capreolus*) traffic collisions in the Belluno province, eastern Italian Alps. *Italian Journal of Animal Science*, 2007, vol. 6, no sup1, p. 848-850.
- DEBEFFE, Lucie, MORELLET, N., BONNOT, Nadège, *et al.* The link between behavioural type and natal dispersal propensity reveals a dispersal syndrome in a large herbivore. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2014, vol. 281, no 1790, p. 20140873.
- DUCROS, Delphine, MORELLET, Nicolas, PATIN, Rémi, *et al.* Beyond dispersal versus philopatry? Alternative behavioural tactics of juvenile roe deer in a heterogeneous landscape. *Oikos*, 2020, vol. 129, no 1, p. 81-92.
- DUNNING, John B., DANIELSON, Brent J., et PULLIAM, H. Ronald. Ecological processes that affect populations in complex landscapes. *Oikos*, 1992, p. 169-175.
- FELDHAMER, George A., GATES, J. Edward, HARMAN, Dan M., *et al.* Effects of interstate highway fencing on white-tailed deer activity. *The Journal of Wildlife Management*, 1986, p. 497-503.
- FLÜCKIGER, W., OERTLI, J. J., et FLÜCKIGER-KELLER, H. The effect of wind gusts on leaf growth and foliar water relations of aspen. *Oecologia*, 1978, vol. 34, no 1, p. 101-106.
- GRIMM, Nancy B., FAETH, Stanley H., GOLUBIEWSKI, Nancy E., *et al.* Global change and the ecology of cities. *science*, 2008, vol. 319, no 5864, p. 756-760.
- FORTIN, Daniel, BEYER, Hawthorne L., BOYCE, Mark S., *et al.* Wolves influence elk movements: behavior shapes a trophic cascade in Yellowstone National Park. *Ecology*, 2005, vol. 86, no 5, p. 1320-1330.
- GODDARD, Mark A., DOUGILL, Andrew J., et BENTON, Tim G. Scaling up from gardens: biodiversity conservation in urban environments. *Trends in ecology & evolution*, 2010, vol. 25, no 2, p. 90-98.
- HOOKE, Roger LeB, MARTÍN DUQUE, José Francisco, et PEDRAZA GILSANZ, Javier de. Land transformation by humans: a review. *Ene*, 2013, vol. 12, p. 43.
- HOWARD, Walter E. Innate and environmental dispersal of individual vertebrates. *American Midland Naturalist*, 1960, p. 152-161.
- HUIJSER, Marcel P., DUFFIELD, John W., CLEVENGER, Anthony P., *et al.* Cost–benefit analyses of mitigation measures aimed at reducing collisions with large ungulates in the United States and Canada: a decision support tool. *Ecology and Society*, 2009, vol. 14, no 2.
- LALIBERTÉ, Jérôme et ST-LAURENT, Martin-Hugues. In the wrong place at the wrong time: Moose and deer movement patterns influence wildlife-vehicle collision risk. *Accident Analysis & Prevention*, 2020, vol. 135, p. 105365.
- LESTER, Dion. Effective wildlife roadkill mitigation. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2015, vol. 3, no 1, p. 42-51.
- LONDE, David W., ELMORE, Robert Dwayne, DAVIS, Craig A., *et al.* Why did the chicken not cross the road? Anthropogenic development influences the movement of a grassland bird. *Ecological Applications*, 2022, vol. 32, no 3, p. e2543.

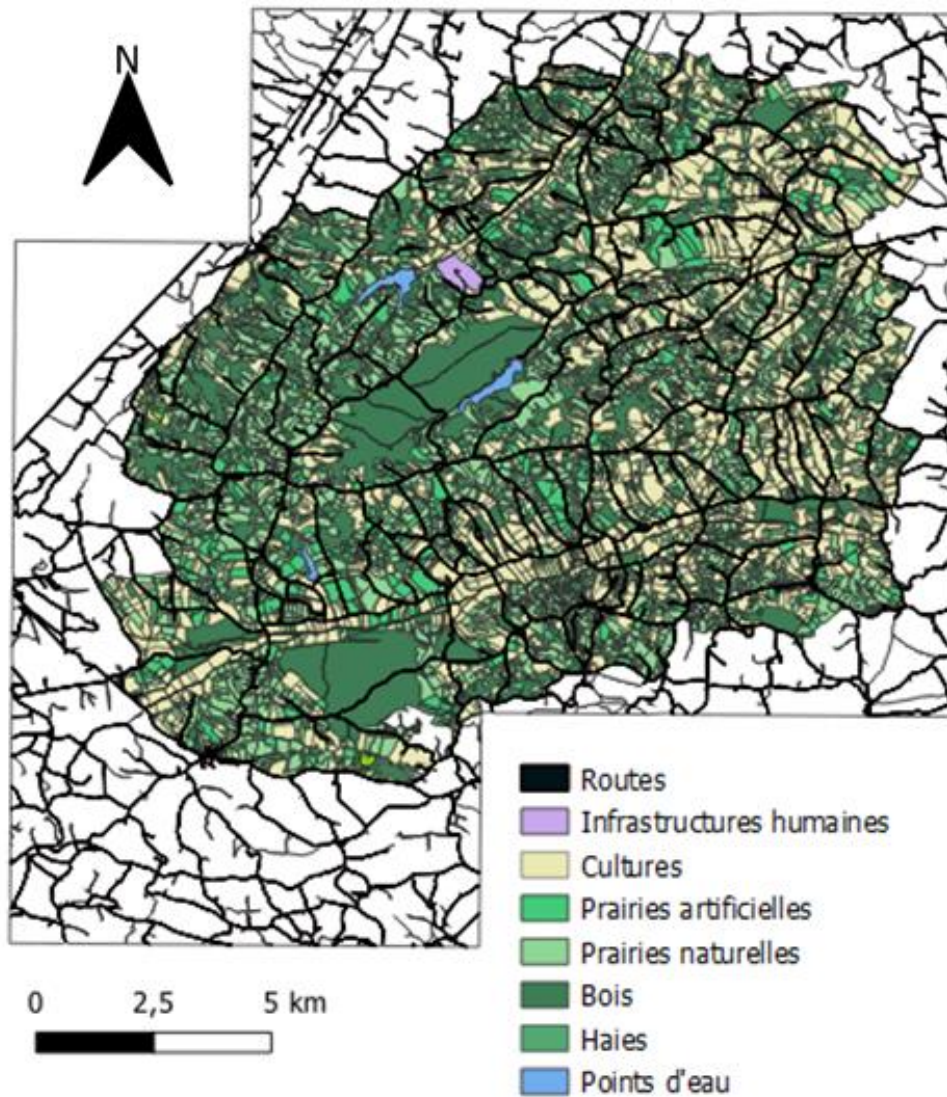
- MALAGNINO, A., MARCHAND, P., GAREL, M., *et al.* Do reproductive constraints or experience drive age-dependent space use in two large herbivores?. *Animal Behaviour*, 2021, vol. 172, p. 121-133.
- MARTIN, Jodie, VOUREC'H, Gwenaël, BONNOT, Nadège, *et al.* Temporal shifts in landscape connectivity for an ecosystem engineer, the roe deer, across a multiple-use landscape. *Landscape ecology*, 2018, vol. 33, no 6, p. 937-954.
- MASTRO, Lauren L., CONOVER, Michael R., *et al.* FREY, S. Nicole. Deer-vehicle collision prevention techniques. *Human-Wildlife Conflicts*, 2008, vol. 2, no 1, p. 80-92.
- MCCORQUODALE, Scott M. Sex-specific movements and habitat use by elk in the Cascade Range of Washington. *The Journal of wildlife management*, 2003, p. 729-741.
- MEISINGSET, Erling L., LOE, Leif E., BREKKUM, Øystein, *et al.* Red deer habitat selection and movements in relation to roads. *The Journal of Wildlife Management*, 2013, vol. 77, no 1, p. 181-191.
- MONESTIER, Chloé, MORELLET, Nicolas, GAILLARD, Jean-Michel, *et al.* Is a proactive mum a good mum? A mother's coping style influences early fawn survival in roe deer. *Behavioral Ecology*, 2015, vol. 26, no 5, p. 1395-1403.
- MORELLET, Nicolas, VAN MOORTER, Bram, CARGNELUTTI, Bruno, *et al.* Landscape composition influences roe deer habitat selection at both home range and landscape scales. *Landscape Ecology*, 2011, vol. 26, no 7, p. 999-1010.
- MORELLET, Nicolas, BONENFANT, Christophe, BÖRGER, Luca, *et al.* Seasonality, weather and climate affect home range size in roe deer across a wide latitudinal gradient within Europe. *Journal of Animal Ecology*, 2013, vol. 82, no 6, p. 1326-1339.
- MUFF, Stefanie, SIGNER, Johannes, *et al.* FIEBERG, John. Accounting for individual-specific variation in habitat-selection studies: Efficient estimation of mixed-effects models using Bayesian or frequentist computation. *Journal of Animal Ecology*, 2020, vol. 89, no 1, p. 80-92.
- MÜLLER, Roger *et al.* VON KEYSERLINGK, Marina AG. Consistency of flight speed and its correlation to productivity and to personality in Bos taurus beef cattle. *Applied Animal Behaviour Science*, 2006, vol. 99, no 3-4, p. 193-204.
- NEUMANN, Wiebke, ERICSSON, Göran, DETTKI, Holger, *et al.* Difference in spatiotemporal patterns of wildlife road-crossings and wildlife-vehicle collisions. *Biological Conservation*, 2012, vol. 145, no 1, p. 70-78.
- NOUVELLET, P., RASMUSSEN, G. S. A., MACDONALD, D. W., *et al.* Noisy clocks and silent sunrises: measurement methods of daily activity pattern. *Journal of Zoology*, 2012, vol. 286, no 3, p. 179-184.
- OLSON, Daniel D., BISSONETTE, John A., CRAMER, Patricia C., *et al.* Vehicle collisions cause differential age and sex-specific mortality in mule deer. *Advances in Ecology*, 2014, vol. 2014, p. 1-10.
- PADIÉ, Sophie, MORELLET, Nicolas, HEWISON, AJ Mark, *et al.* Roe deer at risk: teasing apart habitat selection and landscape constraints in risk exposure at multiple scales. *Oikos*, 2015, vol. 124, no 11, p. 1536-1546.
- PAGON, Nives, GRIGNOLIO, Stefano, PIPIA, Anna, *et al.* Seasonal variation of activity patterns in roe deer in a temperate forested area. *Chronobiology international*, 2013, vol. 30, no 6, p. 772-785.
- PARRIS, Kirsten M. *et al.* SCHNEIDER, Angela. Impacts of traffic noise and traffic volume on birds of roadside habitats. *Ecology and society*, 2009, vol. 14, no 1, p. 1-10.

- PASSONI, Gioele, COULSON, Tim, RANC, Nathan, *et al.* Roads constrain movement across behavioural processes in a partially migratory ungulate. *Movement ecology*, 2021, vol. 9, no1, p.1-12.
- POUYAT, Richard V., PATAKI, Diane E., BELT, Kenneth T., *et al.* Effects of urban land-use change on biogeochemical cycles. In : *Terrestrial ecosystems in a changing world*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2007. p. 45-58.
- ROSA, Eugene A. et DIETZ, Thomas. Human drivers of national greenhouse-gas emissions. *Nature climate change*, 2012, vol. 2, no 8, p. 581-586.
- SAINT-ANDRIEUX, Christine, CALENGE, Clément, et BONENFANT, Christophe. Comparison of environmental, biological and anthropogenic causes of wildlife–vehicle collisions among three large herbivore species. *Population Ecology*, 2020, vol. 62, no 1, p. 64-79.
- SEIGLE-FERRAND, Juliette, MARCHAND, Pascal, MORELLET, Nicolas, *et al.* On this side of the fence: Functional responses to linear landscape features shape the home range of large herbivores. *Journal of Animal Ecology*, 2022, vol. 91, no 2, p. 443-457
- SMITH, Brian R. et BLUMSTEIN, Daniel T. Fitness consequences of personality: a meta-analysis. *Behavioral Ecology*, 2008, vol. 19, no 2, p. 448-455.
- SPELLERBERG, I. A. N. Ecological effects of roads and traffic: a literature review. *Global Ecology & Biogeography Letters*, 1998, vol. 7, no 5, p. 317-333.
- TROMBULAK, Stephen C. et FRISSELL, Christopher A. Review of ecological effects of roads on terrestrial and aquatic communities. *Conservation biology*, 2000, vol. 14, no 1, p. 18-30.
- TUFTO, Jarle, ANDERSEN, Reidar, et LINNELL, John. Habitat use and ecological correlates of home range size in a small cervid: the roe deer. *Journal of Animal Ecology*, 1996, p. 715-724.
- UNDERHILL, Jackie E. et ANGOLD, Penny G. Effects of roads on wildlife in an intensively modified landscape. *Environmental Reviews*, 1999, vol. 8, no 1, p. 21-39.
- VALENTE, Ana M., FONSECA, Carlos, MARQUES, Tiago A., *et al.* Living on the edge: roe deer (*Capreolus capreolus*) density in the margins of its geographical range. *PloS one*, 2014, vol. 9, no 2, p. e88459.



## Annexes

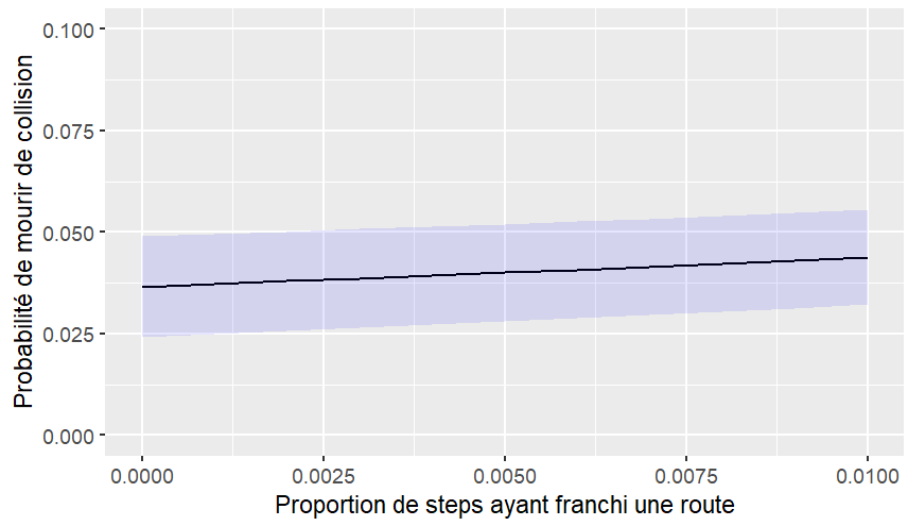
Annexe 1. Représentation du site d'étude, les routes étant marquées en noir, réalisée sur QGIS.



Annexe 2. Résumé des résultats des modèles linéaires généralisés mixtes. La première colonne contient les variables explicatives et la première ligne les variables dépendantes. Les astérisques signifient que les valeurs P étaient significatives ( $P < 0.05$ ). Les cases bleues signifient que les effets des variables explicatives (première colonne) sur les variables dépendantes (première ligne) n'ont pas été testés.

|   | Probabilité de franchissement (variable binaire) = « route » |          |     | Statut de la step : observée ou aléatoire (variable binaire) = « statut » |          |     | Proportion de steps ayant franchi une route par individu |          |     | Probabilité de mourir de collision (variable binaire) = « collision » |          |     |
|---|--|----------|-----|---|----------|-----|--|----------|-----|---|----------|-----|
|   | P  | $\chi^2$ | ddl | P   | $\chi^2$ | ddl | P  | $\chi^2$ | ddl | P   | $\chi^2$ | ddl |
| Proportion d'habitat dans l'ellipse environnant la step :<br>- haie<br>- bois<br>- culture automne                            | ***  | 10.9     | 1   | ***   | 106      | 1   |  |          |     |   |          |     |
|   | ***  | 590      | 1   | ***   | 19.3     | 1   |  |          |     |   |          |     |
| Association d'habitats :<br>-« changement d'habitat » (variable binaire)<br>-« association d'habitat » (variable factorielle) | ***  | 7153     | 1   | ***   | 24.8     | 1   |  |          |     |   |          |     |
|   | ***  | 758.14   | 8   |   |          |     |  |          |     |   |          |     |
| Sexe*saïson   | ***  | 98.4     | 4   | ***   | 2155584  | 20  |  |          |     |   |          |     |
| Sexe*moment de la journée   | ***  | 133.25   | 3   | ***   | 2140035  | 16  |  |          |     |   |          |     |
| Note comportementale  |  |          |     |   |          |     | 0.999  | 0.2      | 1   |   |          |     |
| Proportion de steps ayant franchi une route par individu  |  |          |     |   |          |     |  |          |     | 0.607   | 0.3      | 1   |
| Coefficient de sélection pour les steps franchissant des routes   |  |          |     |   |          |     |  |          |     | 0.380   | 0.7      | 1   |

Annexe 3. Prédications du modèle de la probabilité de mourir de collision en fonction de la proportion de steps ayant franchi une route par individu. L'erreur standard est représentée en mauve.



## Résumé

Depuis plusieurs décennies, les activités anthropiques se sont intensifiées. La fragmentation des habitats, par la construction d'infrastructures routières, contribue notamment à l'érosion de la biodiversité. Les impacts de ces structures humaines sur la faune sont indirects (en agissant comme des barrières isolant les populations) mais également directs, engendrant une mortalité par collision de la faune. La fréquence des collisions entre véhicules et ongulés ayant augmenté ces dernières années, comprendre le comportement de la faune sauvage face au risque représenté par ces infrastructures est un enjeu majeur de la recherche actuelle en conservation de la faune sauvage. Le but de notre étude était ainsi de mettre en évidence les variations spatio-temporelles dans le franchissement des routes chez le chevreuil (*Capreolus capreolus*), ainsi que d'analyser les différences individuelles en termes d'exposition au risque que représentent les routes. Enfin, nous voulions comparer les comportements spatiaux entre des individus morts de collision et ceux ayant survécu. En analysant les déplacements de plus de 300 chevreuils dans un paysage rural hétérogène entre 2005 et 2020, notre étude a montré : (1) des variations saisonnières du franchissement des routes (2) et nycthémerales, (3) une influence de l'habitat local sur le franchissement des routes, (4) pas d'effet notable de la personnalité individuelle sur le franchissement et (5) un effet biologique du franchissement des routes sur la probabilité de mourir de collision.

## Abstract

For many decades, anthropic activities have increased, modifying landscapes. Habitat fragmentation, by the construction of roads, leads to biodiversity erosion. Impacts of those anthropic structures on fauna are both indirect (acting like barriers isolating populations) and direct, responsible for death of wild animals by collision. Collisions frequency between vehicles and ungulates has increased lately. Therefore, understanding the behavior of wildlife facing the risk that represent those roads is a major concern in conservation ecology. The aim of our study was to reveal spatio-temporal variations in roads crossing of roe deer (*Capreolus capreolus*), and to analyze as well interindividual differences in terms of risk exposure to roads. Finally, we aimed at comparing spatial behavior in risk taking of individuals dead because of collision and those that survived. We analyzed movements of more than 300 deers in a rural heterogeneous landscape between 2005 and 2020. Our study revealed (1) seasonal variations in road crossing, (2) and nycthemeral variations, (3) influence of local habitat on road crossing,

(4), no visible effect of individual personality on crossing and (5) biological effect of road crossing on probability to die because of collision.