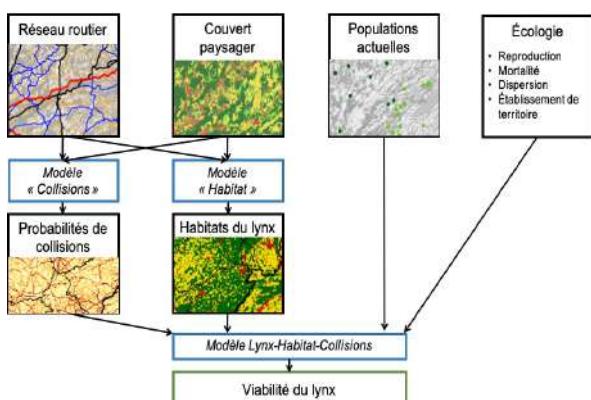


Éviter, réduire et compenser le risque de mortalité du Lynx par collision avec les véhicules de transport

Développement d'un outil prédictif opérationnel à destination des gestionnaires des infrastructures de transport terrestre couplant risque de collision, viabilité des populations de lynx et enjeux des territoires

Rapport final
Septembre 2021



Crédits photos page de garde :

- *Lynx mort / Emmanuel Renaud – ONCFS / SD25*
- *Atelier de travail ERC-Lynx / CROC*
- *Paysage forestier / CROC*

Contexte de réalisation du projet ERC-Lynx

Réponse à l'appel à projets 2017 du programme ITTECOP (Infrastructures de Transports Terrestres, ECOsystèmes et Paysages).

Proposition dans le cadre de l'Axe de recherche n°2.1 / Gestion territoriale des fonctionnalités écologiques : ajustement, transition, réversibilité.

- a) Interactions entre écosystèmes et ILTe
- b) Bilan et évolution de la séquence ERC
- c) Ajustement aux changements institutionnels des ILTe

Budget total : 521.767,50 €

Budget ITTECOP : 79.949,20 €

Durée : 2018-2020 (étendue à 2021 dans le contexte Covid-19)

Équipe projet

UMR 5175 Centre d'Ecologie Fonctionnelle & Evolutive (CEFE/CNRS) :

- Olivier Gimenez, Directeur de recherche CNRS, biostatisticien et modélisateur
- Sarah Bauduin, Post-doctorante (jusqu'au 30/11/2019, financement ERC-Lynx)
- Aurélie Coulon, Maitre de Conférences du Muséum national d'Histoire naturelle

Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema/DTer Est) :

- Alain Morand, Chargé d'études en environnement - biodiversité, aménagement et infrastructure
- Luc Chrétien, Chef du Groupe Biodiversité, Aménagement et Nature en Ville
- Emilie Busson, Assistante d'études en biodiversité et aménagements
- Delphine Souillot, Stagiaire de Master 2 (financement ERC-Lynx) puis Vacataire (CDD 1,5 mois)
- Lucille Tournier, Vacataire (CDD 1 mois, financement ERC-Lynx)

Centre de Recherche et d'Observation sur les Carnivores (CROC) :

- Estelle Germain, Chargée de projet
- Anaïs Charbonnel, Chargée d'études scientifiques
- Charlotte-Anaïs Olivier, Stagiaire de Master 2 (financement ERC-Lynx)

Office français de la biodiversité (OFB)

- Sarah Bauduin, Chargée de recherche (à partir du 01/12/2019)
- Nolwenn Drouet-Hoguet, Cheffe d'équipe Loup-Lynx
- Christophe Duchamp, Chargé de recherche

Citation du document

Équipe projet ERC-Lynx (2021) Éviter, réduire et compenser le risque de mortalité du Lynx par collision avec les véhicules de transport. Développement d'un outil prédictif opérationnel à destination des gestionnaires des infrastructures de transport terrestre couplant risque de collision, viabilité des populations de lynx et enjeux des territoires. Projet ITTECOP 2018-2020, CEFE/Cerema/CROC/OFB. Version finale de septembre 2021. 300p.

Résumé

Le développement des infrastructures de transport terrestres (ITT) et le morcellement croissant des paysages ont un impact sur la faune sauvage, au travers du risque de collisions avec les véhicules et de la perte d'habitat favorable.

Le Lynx boréal (*Lynx lynx*), une des trois espèces de grands carnivores protégée en France, n'échappe pas à ces menaces. Plus particulièrement, les collisions avec les véhicules sont l'une des principales causes de mortalité du lynx en France et ailleurs en Europe.

Ainsi, les projets d'aménagement, qu'ils soient routiers ou bâtis, sont susceptibles d'impacter la viabilité des populations de lynx à plus ou moins long terme. D'ailleurs, les porteurs de projets d'aménagement entrepris dans des zones où le lynx est potentiellement présent doivent réaliser une évaluation environnementale et mettre en œuvre la séquence Éviter-Réduire-Compenser (ERC).

C'est dans ce contexte que l'outil ERC-Lynx a été développé comme un outil d'aide à la décision pour enrichir les réflexions autour des projets d'aménagement et guider les acteurs du territoire dans le choix le moins impactant. Pour cela, il renseigne sur les effets des projets aménagements sur la viabilité des populations de lynx à l'horizon de 50 ans.

Notre projet a permis de mettre en commun, de compléter et d'exploiter les résultats de précédents travaux majeurs (modélisation, diagnostics écologique et technique) en lien avec la viabilité des populations de lynx, les risques de collision lors du franchissement d'ITT et les mesures correctrices. Il a abouti à une première version d'un outil à portée opérationnelle sur lequel les opérateurs techniques¹ pourront s'appuyer dans leur processus de prise de décision nécessaire à l'aménagement du territoire.

Ainsi, nos principaux objectifs ont été de contribuer :

- (1) Au maintien d'une connectivité écologique fonctionnelle entre les habitats favorables au lynx sur l'ensemble de son aire de répartition en France et à la mise en œuvre de mesures correctrices permettant d'éviter, de réduire ou de compenser le risque de collision.
- (2) A la création, l'utilisation et l'appropriation d'un outil innovant et robuste (issu d'une approche prédictive par modélisation et de données réelles de terrain) en vue de favoriser et de renforcer la mise en œuvre de politiques publiques d'aménagement du territoire telle la Trame Verte et Bleue et ses déclinaisons régionales (Schéma Régional Cohérence Écologique / Schéma Régional d'Aménagement, de Développement durable et d'Égalité du Territoire).

Le présent rapport vise à présenter le projet dans son ensemble au travers de la démarche de co-construction (partie 1), de la description détaillée du modèle et de l'interface développés grâce au recrutement d'une post-doctorante (partie 2) et des principaux résultats des deux stages effectués dans le cadre du projet (partie 3). Enfin, nous proposons quelques retours réflexifs sur la réussite, les points délicats et les poursuites du projet dans le cadre du Plan National d'Action en faveur du lynx en France (partie 4).

Mots clés : *Lynx lynx*, risque de collision, connectivité écologique, viabilité, enjeux territoriaux, ITTs, séquence ERC, outil prédictif opérationnel

¹ Services instructeurs (p.ex. DREAL), collectivités (p.ex. Régions), concessionnaires d'ITT publics ou privés (Services route des Conseils Départementaux, APRR, Sanef, etc.), gestionnaires d'espaces protégés (p.ex. Parc Naturel Régional, Conservatoires d'Espaces Naturels, etc.), bureaux d'études.

Abstract

The development of terrestrial transport infrastructure and the increasing fragmentation of landscapes have an impact on wildlife, through the risk of collisions with vehicles and the loss of favourable habitat.

The Eurasian lynx (*Lynx lynx*), one of the three large carnivore species protected in France, is not immune to these threats. In particular, collisions with vehicles are one of the main causes of Lynx mortality in France and elsewhere in Europe.

Therefore, development projects, whether road or building, are likely to impact the viability of lynx populations in the more or less long term. In this context, developers of development projects in areas where the lynx is potentially present must carry out an environmental assessment and implement the Avoid-Reduce-Compensate (ERC) sequence.

It is in this context that the ERC-Lynx tool was developed as a decision-making aid to enrich the reflections on development projects and to guide the actors of the territory in the least impacting choice. To this end, ERC-Lynx provides information on the effects of development projects on the viability of lynx populations over a 50-year period.

Our project has made it possible to gather, complement and exploit the results of previous works (modelling, ecological and technical diagnostics) in relation to the viability of lynx populations, the risks of collision when crossing terrestrial transport infrastructure and corrective measures. Our project has resulted in a first version of an operational tool that technical operators will be able to use in their decision-making process for land use planning.

Our main objectives were to contribute to:

- (1) To maintain functional ecological connectivity between habitats favorable to the lynx throughout its range in France and to implement corrective measures to avoid, reduce or compensate for the risk of collision.
- (2) The creation, use and appropriation of an innovative and robust tool (based on a predictive approach using modelling and real field data) with a view to promoting and reinforcing the implementation of public land-use planning policies such as the Green and Blue Framework and its regional variations (Regional Ecological Coherence Plan / Regional Plan for Land Use, Sustainable Development and Equality).

This report aims to present the project as a whole through the co-construction process (part 1), the detailed description of the model and interface developed thanks to the hiring of a post-doctoral researcher (part 2) and the main results of the two internships carried out as part of the project (part 3). Eventually, we offer some reflections on the success, the delicate points and the continuation of the project within the framework of the National Action Plan for Lynx in France (part 4).

Key words: *Lynx lynx*, collision risk, ecological connectivity, viability, territorial issues, terrestrial transport infrastructure, ERC sequence, operational predictive tool

SOMMAIRE

Contexte	10
Partie 1. La démarche de construction de l'outil ERC-Lynx : une approche participative	13
1.1. Réunion de lancement : présenter le projet, proposer aux acteurs invités d'y participer et identifier les parties prenantes.....	14
1.2. Atelier n°1 : présenter le modèle, examiner les points faibles, identifier ce qu'il convient de faire évoluer et d'améliorer avec les participants.....	15
1.3. Atelier 2 : valider définitivement l'approche (modèles) et discuter de scénarios d'aménagement très simple à montrer en séance.....	18
1.4. Atelier n°3 : faire tester aux acteurs l'outil en séance sur la base d'exemple proposés par l'équipe projet et discuter les dernières pistes d'amélioration sur la base de cette première prise en main	23
1.5. Un webinaire de restitution	25
Partie 2. L'outil, les modèles mathématiques sous-jacents et l'interface ergonomique.....	27
2.1. L'outil ERC-Lynx : quèsaco ?	27
2.2. Une interface accessible à tous	28
2.3. Description du modèle Lynx-Collision-Habitat sous-jacent à l'outil	32
2.5. Perspectives d'utilisation	37
Partie 3. Apports des travaux réalisés par les stages de Master 2	38
Partie 4. Retours réflexifs sur le projet	47
3.1. Atteinte de l'objectif initial	47
3.2. Déroulé du projet.....	47
3.3. Co-construction du modèle et de l'outil.....	48
3.4. Difficultés rencontrées et pistes de résolution.....	48
Partie 4. Liste des productions	50
Références bibliographiques.....	54
Annexes	57

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Liste qualitative des acteurs impliqués dans l'élaboration de l'outil ERC-Lynx.....	13
Figure 2 : Démarche de co-construction de l'outil ERC-Lynx.....	13
Figure 3 : Réunion de lancement du projet ERC-Lynx le 05/03/2018 à Besançon (Crédit photo : CROC).	14
Figure 4 : Exemple de diapositives présentées à l'occasion de la réunion de lancement du projet. A gauche : nature des projet ITTECOP. A droite : le modèle global sous-jacent à l'outil ERC-Lynx.....	15
Figure 5 : Premier atelier du projet ERC-Lynx le 05/06/2018 à Besançon (Crédit photo : CROC).	16
Figure 6 : Exemple de diapositives présentées à l'occasion de l'atelier n°1. Le modèle Lynx-Collision-Habitat est un modèle individu-centré spatialement explicite qui s'appuie sur un modèle de collisions et un modèle d'habitat. A l'origine, la conception de ces deux modèles devaient s'appuyer sur des travaux antérieurs. Au final, ils ont été entièrement revisités afin de s'assurer d'utiliser les dernières données lynx disponibles au moment du projet ERC-Lynx d'une part et d'autre part, de s'appuyer sur des travaux récents de modélisation (voir Atelier n°3).....	17
Figure 7 : Deuxième atelier du projet ERC-Lynx le 27/09/2018 à Besançon (Crédit photo : Cerema Est).....	18
Figure 8 : Évolution du modèle de collision entre l'atelier 1 et l'atelier 2 en s'appuyant sur les travaux de Visintin et al. 2016 (diapositives présentées lors de l'atelier 2).....	19
Figure 9 : Évolution du modèle d'habitat entre l'atelier 1 et l'atelier 2 en s'appuyant sur les travaux de Louvrier et al. 2018 (diapositives présentées lors de l'atelier 2).....	20
Figure 10 : Présentation de la méthode de construction de la population initiale du modèle IBM lors de l'atelier 2 (diapositives présentées en séance).....	20
Figure 11 : Rapprochement entre les modèles sous-jacents à l'outil ERC-Lynx (schéma du haut rappelant ses différentes composantes) et l'interface d'utilisation (illustration du bas). La page d'accueil de l'outil ERC-Lynx permet de visualiser les différents onglets de travail proposés (« Modifier le réseau routier », « Modifier le paysage », « Modifier la population de lynx »).....	21
Figure 12 : Exemples d'idées d'améliorations proposées par les acteurs à l'issue du brainstorming réalisés à partir des scénarios théoriques testés sur l'interface pour les onglets « Collisions lynx-véhicules » et « Habitat du lynx ».....	22
Figure 13 : Troisième et dernier atelier de travail du projet ERC-Lynx le 24/09/2019 à Besançon (Crédit photo : Cerema Est).....	23
Figure 14 : Programme de la journée de restitution du Projet ERC-Lynx organisée sous forme de webinaire le 4 juin 2021.	26
Figure 15 : Schéma illustrant la construction du modèle Lynx-Collision-Habitat sous-jacent à l'outil ERC-Lynx.	32
Figure 12 : Travaux en cours sur l'amélioration de l'outil et son intégration dans le cadre des démarches de travail du Plan National d'Actions en faveur du lynx en France, du Plan Régional d'Action en faveur du lynx dans le Massif des Vosges et dans la démarche ERC-Lynx.....	37
Figure 17 : Méthodes d'étude de la connectivité potentielle pour le Lynx boréal. En vert, les méthodes déjà explorées pour le lynx dans d'autres pays et reprises dans le cadre du stage pour le lynx en France. En bleu, les méthodes jamais explorées pour le lynx dans la littérature scientifique et explorées pendant le stage.	41
Figure 18 : A gauche : Carte de la connectivité potentielle pour le lynx en France obtenues avec la méthode du chemin de moindre coût (LCP) et l'approche des barycentres (les points de départ et d'arrivée sont les barycentres de chacun des patchs d'habitat favorable). Au milieu : Cartes de la connectivité potentielle pour le lynx en France obtenues avec la méthode de la théorie des circuits (les fortes valeurs de courant en vert représentent une forte probabilité que les lynx empruntent les corridors identifiés). A droite : Cartes de la connectivité potentielle pour le lynx en France obtenues avec le modèle IBM sans les probabilités de mortalité par collisions (plus la couleur s'approche du vert et plus le nombre de passages de lynx est important).....	41

Figure 19 : Liste des variables « Transport » utilisées (en rappel Gaillard et al. (2012), celles utilisées dans le modèle ERC Lynx en 2018, recherchées dans le cadre de ce stage auprès des collectivités et d'associations).44
Figure 20 : Carte factorielle d'une analyse des correspondances multiples (ACM) entre X données de collision et Y variables Modalités « transport ».....44
Figure 21 : Le 22 juillet 2018, Delphine Souillot, au premier plan à gauche, en présence des agents de l'ONCFS (devenue OFB en 2020) et d'un agent d'APRR discutant de mesures d'amélioration des clôtures. Ce tronçon est particulièrement à risque pour les lynx (crédit photo Cerema Est)45
Figure 22 : Extrait d'une diapositive de la soutenance orale de Delphine Souillot « Carte de chaleur des principaux points chauds de collision dans le massif du Jura ».46

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1 : Actes de la journée de restitution du projet ERC-Lynx qui s'est tenue en webinaire le 4 juin 2021.....59
ANNEXE 2 : Bauduin S., Germain E., Zimmermann F., Idelberger S., Herdtfelder M., Heurich M., Kramer-Schadt S., Duchamp C., Drouet-Hoguet N., Morand A., Blanc L., Charbonnel A. & Gimenez O. Eurasian lynx populations in Western Europe: What prospects for the next 50 years? A soumettre à Biological Conservation.....127
ANNEXE 3 : Olivier C.-A. 2018. Étude comparative de différentes méthodes de modélisation de corridors écologiques pour le Lynx boréal en France. Rapport de stage de Master 2 réalisé au CROC en collaboration avec le CNRS CEFE, Lucy, France, 42p.....201
ANNEXE 4 : Souillot D. 2019. Réduire et éviter le risque de mortalité du Lynx boréal (<i>Lynx lynx</i>) par collision avec les véhicules de transports terrestres dans le Massif du Jura - Typologie des tronçons accidentogènes et profils biologiques des lynx morts. Stage de Master 2 au Cerema DTer Est. Université de Perpignan Via Domitia, Master Biodiversité, Ecologie, Evolution, Parcours "Biodiversité et Développement Durable. 48p.....245
ANNEXE 5 : Plaquette de présentation 2021 du projet ITTECOP ERC-Lynx.....295

REMERCIEMENTS

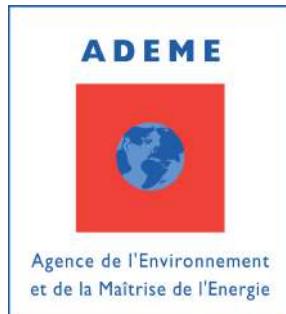
L'équipe-projet ERC-Lynx tient à remercier l'ensemble de l'équipe animatrice du programme ITTECOP, en particulier Yannick Autret, ainsi que le Comité Scientifique, le Conseil d'Orientation, la Fondation pour la Recherche sur la Biodiversité et les partenaires pour le soutien financier, logistique et l'animation scientifique qui a permis la réalisation et la valorisation du projet.

L'équipe projet tient également à remercier sincèrement l'ensemble des acteurs qui ont participé aux différents temps d'échanges que ce soit lors de la réunion de lancement, des trois ateliers, de la journée de restitution ou encore, à l'occasion d'échanges mails, téléphoniques et de sortie sur le terrain. Sans eux, l'outil ERC-Lynx n'aurait pu s'inscrire dans une démarche participative de co-construction visant une meilleure appropriation de cet outil à portée opérationnelle.

Ce projet [ITTECOP](#) a reçu le soutien de la Direction générale des infrastructures de transports et de la mer (Ministère de la transition écologique), de l'Agence nationale de la recherche (ANR-16-CE02-0007) et de la « Mission pour l'Interdisciplinarité » du programme « Osez l'Interdisciplinarité ».

Le CROC a bénéficié du soutien financier du Commissariat à l'Aménagement du Massif des Vosges (FNADT), de la DREAL Grand Est, de la Région Grand Est, de l'Union européenne dans le cadre du Programme Opérationnel FEDER-FSE Lorraine et Massif des Vosges 2014-2020 (programme scientifique « Amélioration de l'état de conservation du Lynx boréal dans le Massif des Vosges ») et de l'UEM Fondation d'Entreprise.

Enfin, cet outil a bénéficié de l'aide de la plateforme [Montpellier Bio-informatique et Biodiversité \(MBB\)](#) du LabEx CeMEB, ANR du programme « Investissements d'avenir » (ANR-10-LABX-04-01).



Contexte

Le Lynx boréal en France : origine, distribution et menaces

En France, le Lynx boréal (*Lynx lynx*) s'est éteint à la fin du 19^{ème} siècle et au début du 20^{ème} siècle avec la destruction des derniers individus. Le Massif des Vosges a été le premier touché par cette extinction (17^{ème} siècle), suivi par le Jura et le Massif Central (19^{ème} siècle), et enfin les Alpes (20^{ème} siècle). Les causes majeures associées à cette extinction sont la chasse, l'augmentation de la fragmentation des forêts ainsi que la diminution de ses proies principales, les ongulés sauvages, causée par la déforestation et la chasse. L'habitat et les ressources alimentaires du félin se sont ainsi progressivement réduits entraînant la disparition des derniers lynx (Stahl & Vandel, 1998). Dans les années 60-70, l'évolution des législations européennes en vigueur a laissé place à un contexte écologique favorable au retour de l'espèce (reforestation, augmentation de la densité de proies, protection de l'espèce ; Breitenmoser, 1998 ; Linnell et al., 2009). Comme dans d'autres régions d'Europe de l'ouest où un retour naturel apparaissait compromis voire impossible, des réintroductions ont ainsi été organisées dans le Massif des Vosges entre 1983 et 1993, afin d'assurer le retour de l'espèce dans ce Massif (Vandel et al., 2006). Le noyau jurassien français est quant à lui issu d'un retour naturel d'individus en France depuis le Jura où des réintroductions ont eu lieu dans les années 70 (Breitenmoser & Haller, 1987 ; Breitenmoser et al., 1998, 2007). Dans les Alpes, la présence du lynx fait suite à la dispersion d'individus en provenance du Jura (Vandel & Stahl, 2005 ; Zimmermann et al., 2007 ; Briaudet & Gatti, 2014).

Aujourd'hui, le lynx est présent de manière régulière dans le Massif du Jura tandis que dans les Massifs des Vosges et des Alpes, sa présence est essentiellement occasionnelle (Réseau Loup-Lynx, 2019). Le noyau jurassien constitue en effet le cœur de la population française de lynx (80 % de la superficie de présence régulière de l'espèce en France). Ce noyau a été globalement actif démographiquement jusqu'en 2013 où la superficie de l'aire de présence régulière a commencé à se stabiliser. En 2018, cette aire avoisine les 7 500 km², avec une augmentation notable dans le département du Doubs, une stabilité dans le Jura et une régression dans l'Ain. L'aire de présence occasionnelle apparaît quant à elle stable (Réseau Loup-Lynx, 2019). Les noyaux vosgiens et alpins sont quant à eux bien plus restreints (Marboutin et al., 2011 ; Laurent et al., 2012 ; Réseau Loup-Lynx, 2019). Le noyau vosgien est particulièrement fragilisé avec une aire de présence régulière de 400 km² en 2018 répartis sur trois secteurs (Vosges du sud, Vosges moyennes, Vosges du Nord). A l'inverse, l'aire de présence occasionnelle de ce noyau a tendance à augmenter (Réseau Loup-Lynx, 2019). Le noyau alpin est quant à lui en cours d'installation avec une aire de présence régulière à la hausse depuis 2012 jusque 2017 (1 100 km²) tandis qu'une régression est observée en 2018 avec 900 km². La superficie de présence occasionnelle reste relativement stable (Réseau Loup-Lynx, 2019).

Malgré son retour sur le territoire français depuis près de 30 ans, le lynx continue de faire face à des pressions qui menacent son état de conservation. Quatre menaces principales sont mises en avant (Charbonnel et Germain, 2020) : l'acceptation sociale qui peut s'avérer difficile auprès notamment des acteurs du monde cynégétique et de l'élevage, les destructions illégales, la perte et la fragmentation de l'habitat forestier et enfin, la mortalité accidentelle due aux collisions.

Statut de protection en France, en Europe et à l'international

Le lynx est une espèce protégée et menacée d'extinction sur le territoire français (Loi n°76-629 relative à la protection de la nature, article L.411-1 du Code de l'Environnement, arrêté ministériel du 17 avril 1981 mis à jour le 23 avril 2007, arrêté ministériel du 27 mai 2009). Il est classé « En danger » sur la liste rouge IUCN des espèces menacées en France (IUCN France et al., 2009, 2017). La population vosgienne-palatine est quant à elle considérée « En danger critique » (Liste rouge IUCN / CR ; Kaczensky et al., 2013 ; Kaczensky, 2018). Depuis 2017 (un an après le lancement de la rédaction du PRA), le lynx figure sur la liste des espèces prioritaires pour les politiques publiques en France (Savouré-Soubelet & Meyer, 2018). Il devient une espèce retenue pour les PNA « sa situation appelant à la mise en place d'un plan d'actions coordonné » (IUCN France et al., 2017). Le lynx est également inscrit sur plusieurs listes internationales (Convention de Washington, Convention CITES) et européennes (Directive Habitat Faune Flore, Convention de Berne) justifiant la nécessité d'une protection ou la mise en place de mesures de conservation sur l'ensemble de son aire de répartition. A titre d'exemple, dans les pays de l'Union Européenne (UE), les populations de lynx

sont strictement protégées par la Directive Habitat Faune Flore (CEE 92/43 du 21 mai 1992 ; Kaczensky et al., 2013).

Fragmentation du paysage et risque de collision

L'artificialisation du paysage et les infrastructures linéaires de transport (ILT) peuvent impacter les grands carnivores (Grilo, Smith & Klar, 2015), et tout particulièrement les populations de lynx (Chapron et al., 2014), soit directement (collisions, perte d'habitats, accès accru aux zones de quiétude, etc.) soit plus indirectement (changement de la configuration des paysages et de la disponibilité et abondance des espèces proies, réduction et morcellement des populations, perte de diversité génétique, etc.). Le lynx est en effet reconnu comme espèce exigeante du point de vue de son écologie, en particulier en ce qui concerne les possibilités de connexion entre noyaux de présence en lien avec la fragmentation forestière (Klar et al., 2006 ; Niedziakowska et al., 2006). Le lynx est aussi une espèce territoriale à large domaine vital et aux habitudes alimentaires spécialisées (Stahl & Vandel, 1998). Les ILT, qu'elles soient routières ou ferroviaires, morcellent les habitats au sein même des domaines vitaux du lynx (Klar et al., 2006). Elles peuvent être autant d'occasion de mortalités par collision lors des déplacements journaliers des animaux. Le succès de la dispersion est également lié à la connectivité entre milieux favorables à l'installation définitive (Schmidt, 1998 ; Samelius et al., 2012) et diminue corrélativement avec l'anthropisation et la fragmentation du paysage. La survie des sous-populations à long terme dépend donc de l'existence et de la localisation des continuités écologiques facilitant le déplacement des individus entre les populations sources (au sens démographique et dynamique des populations, ou appelés encore réservoirs de biodiversité au sens de la trame verte et bleue, TVB).

En France, l'analyse spatiale et statistique des collisions fait ressortir qu'elles sont détectées essentiellement sur le réseau routier et très peu sur le réseau ferroviaire (moins de 5% des cas rencontrés ; Morand, 2016). Les autoroutes, les routes nationales et de nombreuses départementales (en particulier les anciennes nationales déclassées) sont responsables quant à elles de la très grande majorité des cas de collision recensés (Morand, 2016). D'ailleurs, plusieurs axes routiers ont été identifiés comme étant très accidentogènes (voir Gaillard et al., 2012 ; Morand 2016 ; Charbonnel & Germain 2020 pour des synthèses). Si toutes les classes d'âge de lynx courent un risque de collision, les jeunes en phase d'émancipation et de dispersion sont particulièrement vulnérables (Kramer Schadt et al., 2004; Zimmermann, 2004; Zimmermann et al., 2005, 2007). Les mâles en rut ou bien les femelles avec jeunes de l'année, en raison de leurs nombreux déplacements à ces périodes sensibles (Jedrzejewski et al., 2002), sont aussi soumis à un risque plus important. Les principaux travaux sur cette problématique en France, en particulier l'étude ITTECOP (Gaillard et al., 2012 ; Hemery et al., soumis) et une synthèse revisitant cette problématique (Morand, 2016) identifient qu'un ensemble multifactoriel de facteurs aggravants interagit et augmente le risque de collision. Ce risque relève autant de facteurs biologiques intrinsèques du lynx (comportement d'adaptation, dynamique des populations) que de facteurs externes (configurations éco-géographiques, caractéristiques des infrastructures, présence d'écopassages, entretien des clôtures, trafic et signalétique etc.).

Politiques environnementales en faveur du lynx

L'élaboration récemment finalisée des Schémas Régionaux de Cohérence Écologique (SRCE) dans le cadre de la politique de la Trame Verte et Bleue (TVB) permet de mieux visualiser, en ce qui concerne l'aire de répartition du lynx, l'ensemble des Massifs et leurs continuités forestières pour les régions les plus concernées par sa présence (dans leurs limites géographiques des SRCE en 2014, c'est-à-dire l'Alsace, la Lorraine, la Franche-Comté et la région Rhône-Alpes). Chaque SRCE intègre le lynx en tant qu'espèce patrimoniale, phare, emblématique ou de cohérence (selon les régions) inféodée aux milieux forestiers de plaine et de montagne (Ecosphère, 2014 ; Ecoscope, 2014 ; Ecosphere & Denny Consultants, 2014 ; Ecovia, Urba3, DREAL et Région Rhône-Alpes, 2014). Par ailleurs, la séquence éviter, réduire et compenser (ERC) « *les impacts sur l'environnement dépasse la seule prise en compte de la biodiversité, pour englober l'ensemble des thématiques de l'environnement (air, bruit, eau, sol, santé des populations...).* Elle s'applique, de manière proportionnée aux enjeux, à tous types de plans, programmes et projets dans le cadre des procédures administratives d'autorisation (étude d'impacts ou étude d'incidences thématiques,

Natura 2000, espèces protégées...). Sa mise en œuvre contribue également à répondre aux engagements communautaires et internationaux de la France en matière de préservation des milieux naturels. Dans la conception et la mise en œuvre de leurs plans, programmes ou projets, il est de la responsabilité des maîtres d'ouvrage de définir les mesures adaptées pour éviter, réduire et, lorsque c'est nécessaire et possible, compenser leurs impacts négatifs significatifs sur l'environnement. »²

La genèse du projet ERC-Lynx

C'est dans cette contexte de travail que le projet ERC-Lynx « Éviter, réduire et compenser le risque de mortalité du lynx par collision avec les véhicules de transport » s'est inscrit en visant le développement d'un outil prédictif opérationnel couplant risque de collision, viabilité des populations de lynx et enjeux des territoires. A terme, la visée opérationnelle de cet outil à destination des gestionnaires des infrastructures de transport terrestre est sa prise en compte dans la mise en œuvre de la séquence ERC pour les projets d'aménagement qui viendraient impacter les zones de présence du lynx en France. Dans cette perspective, l'outil ERC-Lynx, son évolution et sa déclinaison à venir font figures d'actions phares du Plan National d'Action (PNA) en faveur du lynx en France et de la Déclinaison Régionale dans le Massif des Vosges (Gatti, 2020 ; Charbonnel et Germain, 2020).

² Extrait de : <https://www.ecologie.gouv.fr/eviter-reduire-et-compenser-impacts-sur-lenvironnement>

Partie 1. La démarche de construction de l'outil ERC-Lynx : une approche participative

Le caractère innovant de ce projet, notamment au regard du précédent projet ITTECOP 2012 sur la problématique du lynx lié au risque de collision, repose en très grande partie sur le caractère intégrateur des différentes parties intéressées à toutes les étapes. Il ressort en effet de l'expérience du Cerema que de très nombreux projets en écologie routière posent le problème de leur acceptabilité et collaboration insuffisante entre les parties. Cette donnée « psychologique » est essentielle à l'appropriation de nouvelles connaissances et outils. Elle est aussi prioritaire dès lors que la question de l'aménagement du territoire lié à la protection d'une espèce emblématique et patrimoniale que le lynx s'inscrit dans une dynamique socio-économique complexe à plusieurs échelles. La complémentarité des équipes et leur réseau d'acteurs et partenaires, leur implantation locale, nationale et internationale ont été un gage de réussite des objectifs à atteindre dans le présent projet. Ainsi, pendant toute la durée du projet, la construction de l'outil ERC-Lynx s'est appuyée sur une démarche participative de co-construction impliquant de nombreux acteurs (**Figures 1 et 2**) au travers la réalisation d'une réunion de lancement, de trois ateliers participatifs et d'un webinaire de restitution. Également, de nombreux échanges plus ou moins formels, des sorties de terrain, la rédaction de publications vulgarisées ou scientifique, ainsi que la participation à des colloques et des groupes de travail ont nourri le projet au fur et à mesure de son avancement.



Figure 1 : Liste qualitative des acteurs impliqués dans l'élaboration de l'outil ERC-Lynx.



Figure 2 : Démarche de co-construction de l'outil ERC-Lynx.

Les acteurs sont intervenus à la fois dans la dynamique de conception des modèles en attirant l'attention de l'équipe projet autant sur des points de vigilance que dans la dynamique d'élaboration de l'interface, comme son ergonomie et la clarté des instructions.

1.1. Réunion de lancement : présenter le projet, proposer aux acteurs invités d'y participer et identifier les parties prenantes

La réunion de lancement du projet a été organisée le 5 mars 2018 à Besançon sur une demi-journée en présence des acteurs du territoire (près d'une trentaine de personnes hors membres de l'équipe projet ; **Figure 3**). La réunion de lancement a été l'occasion de présenter le projet ITTECOP ERC-Lynx auprès des acteurs potentiellement concernés et de les inviter à participer à la co-construction de cet outil prédictif. Il s'agissait du premier temps d'échange entre les porteurs du projet et les acteurs du territoire au cours duquel l'équipe porteuse, le projet et le calendrier des ateliers ont été présentés. Puis, la trentaine de participants a été invitée à poser des questions qui ont permis de faire émerger les premières idées à intégrer dans la construction du futur modèle sous-jacent au fonctionnement de l'outil. A l'issue de cette première rencontre, une grande partie des participants se sont engagés à suivre les ateliers suivants.



Figure 3 : Réunion de lancement du projet ERC-Lynx le 05/03/2018 à Besançon (Crédit photo : CROC).

Objectifs de la réunion de lancement (**Figure 4**)

- Présenter le projet ITTECOP ERC-Lynx auprès des acteurs potentiellement concernés
- Les associer à la co-construction d'un outil prédictif

Ordre du jour de la réunion de lancement

1. Présentation de l'équipe, du projet, des ateliers
2. Moment d'échanges
3. Manifestation d'intérêt pour les ateliers

Synthèse sur le niveau d'intérêt pour le projet (retour sur les feuilles d'expression distribuées en séance)

Les participants à la réunion ont une forte envie de contribution au projet, avec 23 avis motivés sur les 27 personnes présentes. Ils ont trouvé ce projet très intéressant, innovant et utile. Quelques craintes ont été exprimées notamment concernant l'application concrète des résultats du projet dans les politiques d'aménagement du territoire ainsi que concernant la prise en compte d'une seule espèce dans la définition de l'outil.

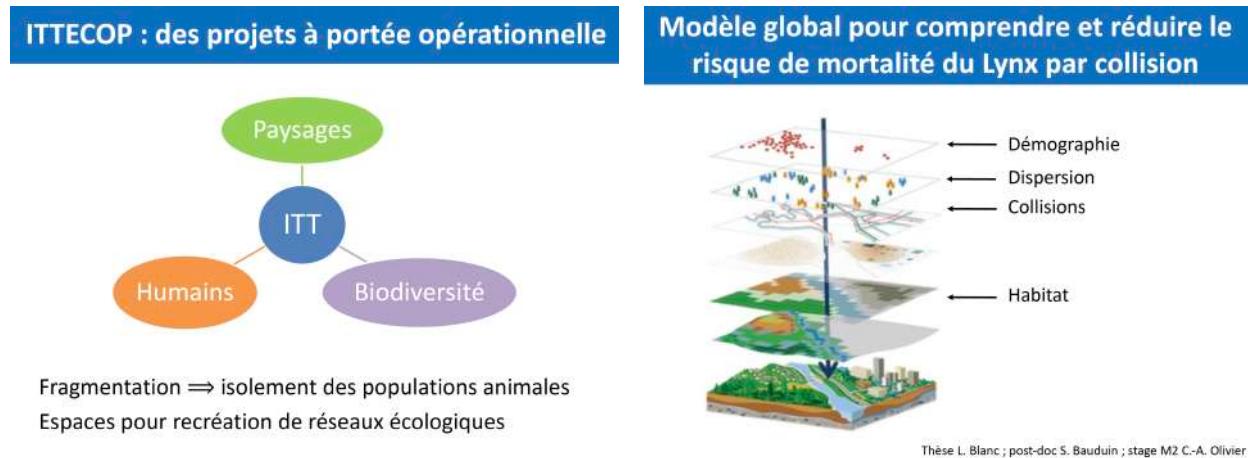


Figure 4 : Exemple de diapositives présentées à l'occasion de la réunion de lancement du projet. A gauche : nature des projets ITTECOP. A droite : le modèle global sous-jacent à l'outil ERC-Lynx.

1.2. Atelier n°1 : présenter le modèle, examiner les points faibles, identifier ce qu'il convient de faire évoluer et d'améliorer avec les participants

Le premier atelier a eu lieu le 5 juin 2018 à Besançon sur une journée en présence d'une vingtaine d'acteurs (hors membres de l'équipe projet ; **Figure 5**). Comme souhaité, ce premier atelier a permis de poursuivre la co-construction de l'outil avec les acteurs. Le modèle de viabilité du lynx a été présenté en détail et les hypothèses sur lesquelles repose ce modèle ont été discutées collectivement (en particulier, les hypothèses sur la biologie du Lynx). Ces échanges ont favorisé la compréhension de l'outil laissant présager une meilleure appropriation. L'opérationnalité a aussi fait l'objet de discussions enrichissantes. Le format de l'interface a commencé à être défini avec les acteurs (selon leurs attentes, leurs besoins, leurs contraintes, etc.) en vue de leur fournir un outil le plus opérationnel possible.



Figure 5 : Premier atelier du projet ERC-Lynx le 05/06/2018 à Besançon (Crédit photo : CROC).

Objectifs de l'atelier n°1

- Présenter le modèle, expliciter et discuter collectivement des hypothèses (en particulier biologiques liées au lynx) sur lesquelles repose ce modèle pour favoriser sa compréhension et assurer l'appropriation de l'interface
- Définir avec les acteurs le format de l'interface selon leurs attentes, leurs besoins, leurs contraintes, etc. pour en faire un outil opérationnel

Ordre du jour de l'atelier n°1

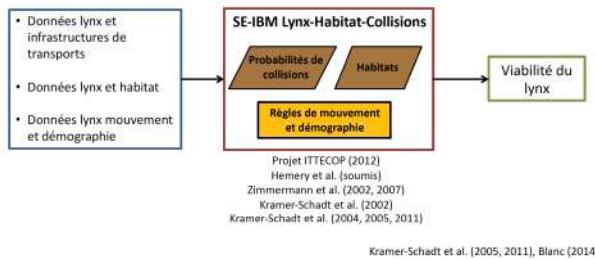
1. Présentation générale du modèle et de l'outil (voir **Figure 6**)
2. Présentation détaillée du modèle (voir **Figure 6**)
3. Présentation des possibilités d'interfaces

Résumé des attentes des acteurs à l'issue de l'atelier n°1

Pour l'interface, certains acteurs souhaitaient avoir la possibilité de rentrer une carte (habitat par exemple, ou trafic) toute faite, mais aussi d'avoir une carte existante modifiable. D'autres souhaits comme le fait de pouvoir modifier les attributs des tables attributaires (intensité du trafic, pourcentage de forêt, etc.) ont été exprimés. Au niveau des paramètres, les paramètres démographiques sont fixés sur la base des connaissances biologiques (taille des territoires du lynx, mortalité, reproduction, etc.). Sur ce point, l'équipe projet a indiqué que ces paramètres ne pourraient pas être modifiés par l'utilisateur de l'outil. Enfin, sur la forme, pouvoir relier les sorties de l'outil aux modifications faites a été mise en avant. **Concernant les cartes de collision et habitat s'appuyant sur des travaux antérieurs, les porteurs de projet se sont engagés suite aux remarques des acteurs à présenter lors de l'atelier 2 des cartes actualisées s'appuyant d'une part, sur une mise à jour des données de présence du lynx en France et, d'autre part, sur la publication récente de travaux de modélisation proposant de nouvelles méthodes statistiques.** Une réflexion a également été conduite par les porteurs de projet sur la possibilité d'intégrer au modèle les corridors en lien avec le travail de stage de Master 2 conduit en 2018. Elle n'a cependant pas pu aboutir dans le temps et le budget alloués au projet (voir Partie 3).

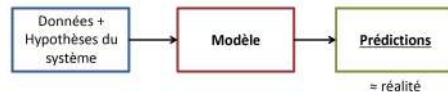
Le modèle Lynx-Habitat-Collisions

- Basé sur travaux antérieurs
- Assemblage de différentes composantes



Un modèle scientifique

- « Un modèle scientifique est une représentation simplifiée, et souvent idéale, de la réalité d'un phénomène permettant d'élaborer une théorie plus ou moins précise adhérant aux observations et de prévoir ce qu'il se passerait dans certaines conditions. »

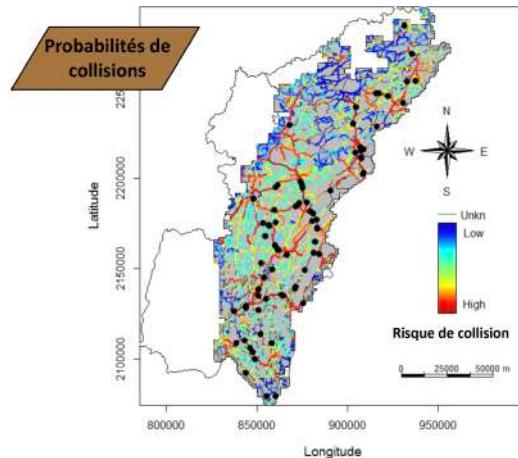


Wikipédia

Déterminants de la probabilité de collisions lynx-véhicules

- 73 collisions documentées 1982-2013 (ONCFS), grille 1x1km²
- Aire d'étude = Jura français
- Approche statistique, plusieurs variables explicatives testées
- Probabilité de collision par cellule en fonction de :
 - Type de structure (autoroute, route principale, route secondaire, rail)
 - Présence du lynx (régulière, récente, irrégulière, absence)
 - Trafic (nombre moyen de voitures/an)

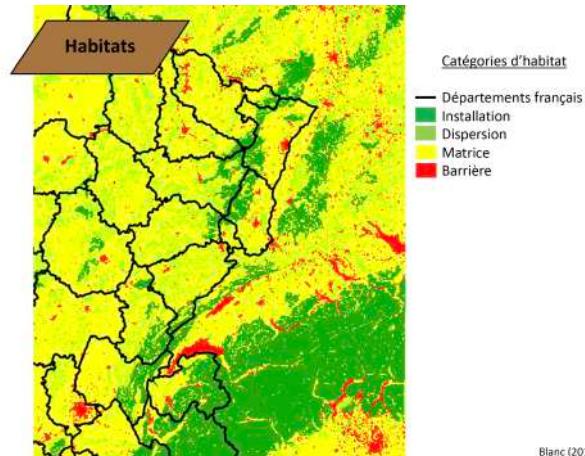
Projet ITTECOP (2012), Hemery et al. (soumis)



Déterminants de l'habitat favorable du lynx

- Données télémétrie, sur grille résolution 1x1km²
- Approche statistique, plusieurs variables explicatives testées
- Préférences d'habitat du lynx déterminées par :
 - Forêts (+)
 - Arbustes (+)
 - Altitude (+)
 - Pente (+)
 - Centres urbains (-)
 - Lacs (-)
- Préférences classées en catégories

Zimmermann and Breitenmoser (2002, 2007), Kramer-Schadt et al. (2002)



Blanc (2014)

Figure 6 : Exemple de diapositives présentées à l'occasion de l'atelier n°1. Le modèle Lynx-Collision-Habitat est un modèle individu-centré spatialement explicite qui s'appuie sur un modèle de collisions et un modèle d'habitat. A l'origine, la conception de ces deux modèles devaient s'appuyer sur des travaux antérieurs. Au final, ils ont été entièrement revisités afin de s'assurer d'utiliser les dernières données lynx disponibles au moment du projet ERC-Lynx d'une part et d'autre part, de s'appuyer sur des travaux récents de modélisation (voir Atelier n°3).

1.3. Atelier 2 : valider définitivement l'approche (modèles) et discuter de scénarios d'aménagement très simple à montrer en séance

Le deuxième atelier a eu lieu le 27 septembre 2018 à Besançon sur une journée en présence d'une quinzaine d'acteurs (hors membres de l'équipe projet ; **Figure 7**). Les améliorations apportées aux modèles de collisions et d'habitat ont été présentées, ainsi qu'une première version de l'interface. Des scénarios d'aménagement très simples ont été présentés en séance puis discutés collectivement afin de montrer aux acteurs comment les implémenter via l'interface.



Figure 7 : Deuxième atelier du projet ERC-Lynx le 27/09/2018 à Besançon (Crédit photo : Cerema Est).

Objectifs de l'atelier n°2

- Présenter les améliorations de l'outil suite aux retours de l'atelier 1 (cartes « habitat » et « collision », population initiale)
- Présenter une version préliminaire de l'interface et échanger sur les améliorations possibles

Ordre du jour de l'atelier n°2

1. Introduction
2. Compléments d'information et amélioration de l'outil depuis l'atelier 1
3. Présentation de l'interface et propositions d'améliorations
4. Retour sur la journée et perspectives pour l'atelier 3

Compléments d'informations et amélioration de l'outil depuis l'atelier 1

Amélioration du modèle de collision

Le modèle de collision a été retravaillé en s'appuyant sur les travaux de Visintin et al. 2016 qui tiennent compte du risque de collision comme fonction de l'exposition et du danger (**Figure 8**). D'une manière générale, l'idée était d'utiliser des variables pertinentes, simples et reproductibles dans le temps. Dans cet objectif, un stage de Master 2 a été planifié courant 2019 afin de compléter l'acquisition de données plus fines pour les variables « transport » (vitesse et trafic, signalétique, conception des voies, présence de clôtures, localisation des éco-ponts, etc.) sur une zone d'étude « test » du Massif du Jura. Ces nouvelles données devaient contribuer à tester les capacités de prédiction du modèle à un grain plus fin. Le travail

d'acquisition d'un tel jeu de données, dans le temps et les moyens techniques et financiers alloués au projet, s'est avéré plus complexe qu'envisagé initialement en raison de leur inexistence ou leur trop grande hétérogénéité d'un tronçon de route à l'autre. En conséquence, le modèle n'a pas pu être alimenté par des données sur la zone d'étude « test » pressentie. Pour le détail du modèle de collision se référer à la **Partie 2** et l'**Annexe 1**.

Collisions lynx-véhicules : les points soulevés par atelier 1

- Etude limitée dans le temps à 1982-2013

Solutions?

- Aire d'étude limitée au Jura français

- Approche de modélisation complexe et gourmande en données, résultats impossibles à extrapoler à toute la zone d'étude

- Travaux précédents à mettre à jour et à rendre plus opérationnels ← **retours atelier 1**

Ecology and Evolution

Volume 6, Issue 17
September 2016
Pages 6409-6421

A simple framework for a complex problem? Predicting wildlife-vehicle collisions

Casey Visintin¹, Rodney van der Ree² & Michael A. McCarthy¹

¹Quantitative and Applied Ecology Group, School of BioSciences, University of Melbourne, Parkville, Vic. 3010, Australia
²Australian Research Centre for Urban Ecology, Royal Botanic Gardens Victoria and School of BioSciences, University of Melbourne, Parkville, 3010, Australia

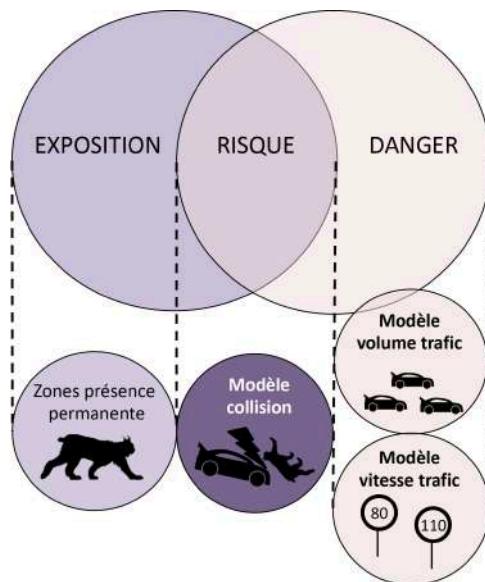


Figure 8 : Évolution du modèle de collision entre l'atelier 1 et l'atelier 2 en s'appuyant sur les travaux de Visintin et al. 2016 (diapositives présentées lors de l'atelier 2).

Amélioration du modèle d'habitat

Une carte de l'habitat favorable du lynx, dynamique dans le temps, a été présentée sur la base des données du Réseau Loup-Lynx (voir **Figure 9** pour la démarche). Plusieurs remarques sont apportées quant à l'existence de biais et d'hétérogénéité spatiale dans l'effort d'échantillonnage. Il est notamment évoqué que le modèle ne prend pas en compte le fait que certains correspondants ne font plus de prospections tandis que d'autres collectent des indices mais ne font pas remonter leurs données. De plus, certains secteurs seraient plus sujets à ce phénomène que d'autres (Hautes-Vosges et Vosges du sud par exemple). Il est important de garder à l'esprit que l'effort d'observation est donc possiblement surestimé. De plus, l'effort est rapporté à la résidence administrative du correspondant et non aux secteurs prospectés. La possibilité d'affiner les données afin de prendre en compte cette hétérogénéité est discutée bien qu'il ne

puisse être envisagée dans le cadre du projet. Certains secteurs de la carte d'habitat montrent des résultats qui peuvent paraître contradictoire avec l'aire de présence régulière du lynx : habitat très favorable à l'ouest du Massif du Jura, peu d'habitat favorable dans le nord qui accueille le cœur de la population de lynx jurassienne. La carte est à interpréter comme les secteurs d'installation possibles du lynx vis-à-vis de l'habitat. Pour le détail du modèle de collision se référer à la **Partie 2** et l'**Annexe 1**.

Habitat favorable du lynx : les points soulevés à l'atelier 1

- Modèle habitat existant trop « simpliste » qui ne décrivait pas l'état des données déjà observés
- Taille et résolution des pixels à ajuster
- Prendre en compte la détection imparfaite en plus des facteurs habitats ?

Solutions ?

- Données réseau loup/lynx, sur grille résolution 10x10km, à ramener sur 1x1km dans l'interface
- Approche statistique, plusieurs variables explicatives testées en intégrant la détection imparfaite

ECOGRAPHY

Volume 41, Issue 4
April 2018
Pages 647-660

Mapping and explaining wolf recolonization in France using dynamic occupancy models and opportunistic data

Julie Louvier, Christophe Duchamp, Valentin Lauret, Eric Marboutin, Sarah Cubaynes, Rémi Choquet, Christian Miquel and Olivier Gimenez

Figure 9 : Évolution du modèle d'habitat entre l'atelier 1 et l'atelier 2 en s'appuyant sur les travaux de Louvier et al. 2018 (diapositives présentées lors de l'atelier 2).

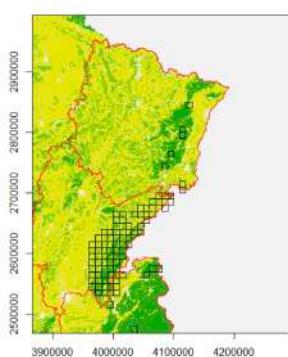
Construction de la population initiale

Suite à la présentation (**Figure 10**), des propositions d'ajustements ont été formulées par les acteurs. Notamment, le Jura alsacien doit être attaché au Massif du Jura car il l'est d'un point de vue géologique et écologique. Cela a été corrigé par l'équipe du projet. Les valeurs d'abondance de lynx modélisées par massif (Vosges, Jura, Alpes) semblent légèrement sur/sous-estimées mais cohérentes. Des questionnements sont néanmoins apparus sur la pertinence de prendre une valeur de densité moyenne de lynx ou de distinguer les densités estimées pour secteur échantillonné dans le Massif du Jura (puis extrapolation pour les massifs des Vosges et des Alpes). L'équipe du projet n'a pas pu apporter de solution sur cette question. Par ailleurs, le fait que le modèle se focalise uniquement sur le territoire français (absence du Massif du Jura suisse) pour simuler les déplacements de lynx a été reconnu comme étant une limite importante car la zone est artificiellement coupée. La perspective d'intégrer la Suisse a été évoquée puis réalisée et étudiée par l'équipe. La même démarche a été entreprise pour l'Allemagne.

Données disponibles

Suivi à grande échelle Réseau

- Cellules 10 km x 10 km
 - Présence régulière (et occasionnelle)
 - A jour 2016-2017
- (Réseau Lynx ONCFS)



Suivi intensif de massif

- 1.14 lynx / 100 km²
- (Gatti et al. 2014)

Créer une population d'individus potentiels en l'état des connaissances disponible

- Estimation d'un nombre d'individu par cellule de présence permanente $\text{Surface} \times \text{Densité} = N \text{ ind. potentiel}$
- Identification des habitats « installation » dans les cellules de présence
- Placement des individus aléatoirement dessus

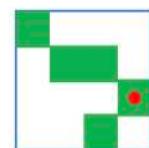


Figure 10 : Présentation de la méthode de construction de la population initiale du modèle IBM lors de l'atelier 2 (diapositives présentées en séance).

Présentation de l'interface

Lors de l'atelier 2, une première version de l'interface a été présentée aux acteurs. Elle a permis de faire le lien entre les modèles sous-jacents à l'outil ERC-Lynx et les onglets de travail proposés par l'interface (**Figure 11**). Tous les détails sur l'interface sont disponibles dans la **Partie 2.2. « Une interface accessible à tous »**.

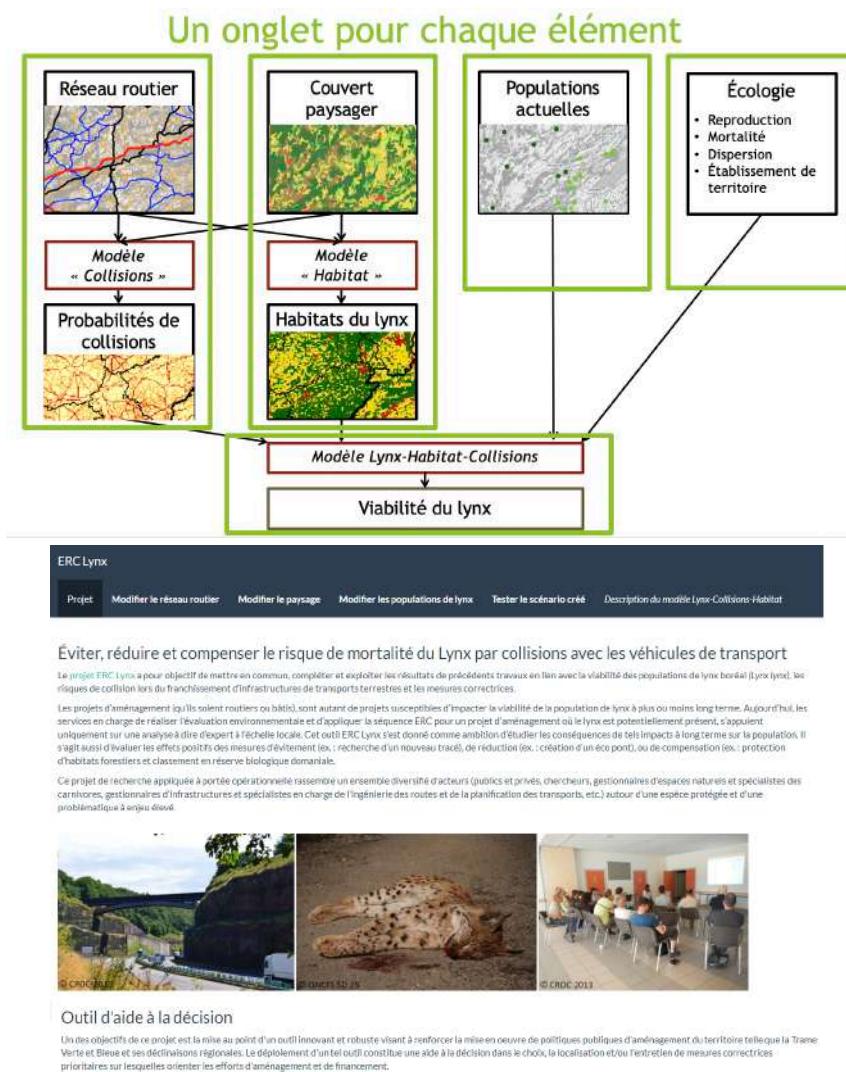


Figure 11 : Rapprochement entre les modèles sous-jacents à l'outil ERC-Lynx (schéma du haut rappelant ses différentes composantes) et l'interface d'utilisation (illustration du bas). La page d'accueil de l'outil ERC-Lynx permet de visualiser les différents onglets de travail proposés (« Modifier le réseau routier », « Modifier le paysage », « Modifier la population de lynx »).

Propositions d'améliorations sur la base de tests réalisés en séance

Pendant l'atelier, les acteurs ont été invités à proposer des scénarios théoriques d'aménagements qu'ils souhaiteraient tester afin de mieux prendre connaissance du fonctionnement des onglets « Collisions lynx-véhicules », « Habitat du lynx » et « Population de lynx » et de proposer des améliorations le cas échéant (**Figure 12**). A l'issue du brainstorming, voici les idées de scénarios théoriques proposées par les acteurs : doublement de voie, passage à faune, création de linéaire, augmentation de la vitesse, requalification de linéaire, requalification de passages à faune, engrillagement (présence de clôture), modification d'un

habitat (forêt à zone urbaine par exemple), création d'un corridor, échangeur avec écran acoustique (hauteur 3-4 m).

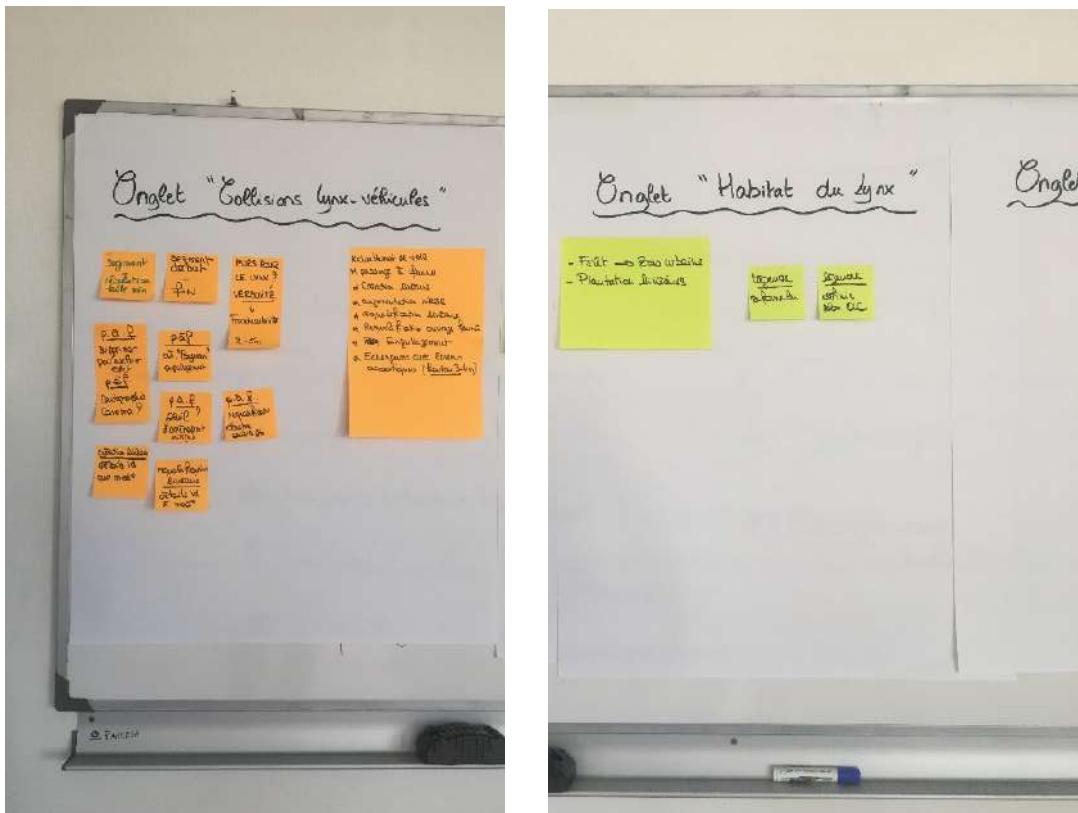


Figure 12 : Exemples d'idées d'améliorations proposées par les acteurs à l'issue du brainstorming réalisés à partir des scénarios théoriques testés sur l'interface pour les onglets « Collisions lynx-véhicules » et « Habitat du lynx ».

Ce travail de brainstorming a permis d'apporter des améliorations à l'onglet « Collisions lynx-véhicules » (qui a été aussi renommé « Modifier le réseau routier » par la suite pour plus de clarté) notamment sur la manière de créer un segment, créer/requalifier des linéaires, travailler la question des passages à faune (localiser, supprimer, requalifier, etc.). De même, l'onglet « Habitat du lynx » (qui a été aussi renommé « Modifier le paysage » par la suite pour plus de clarté) a été amélioré en reformulant la légende des différentes sous-catégories d'habitat et revoir la terminologie de la légende en s'appuyant sur la nomenclature des Corine Land Cover. L'onglet « Population de lynx » a simplement été renommé « Modifier les populations de lynx ».

Résumé des retours des acteurs à l'issue de l'atelier n°2

Les acteurs ont apprécié la démonstration et les améliorations apportées depuis l'atelier 1, même si certains points peuvent sembler encore complexes (couche collision par exemple). L'outil leur semblait concret pour la majorité, avec un gros potentiel d'utilisation malgré le manque de paramètres liés aux ouvrages (limite de l'outil). L'interface leur est apparu relativement simple, fonctionnelle, lisible et ergonomique. L'atelier fut participatif et s'est bien déroulé avec des échanges intéressants et avec une diversité d'acteurs présente. Quelques doutes ont néanmoins été émis quant à une large utilisation de l'outil et sa pérennité dans le temps.

1.4. Atelier n°3 : faire tester aux acteurs l'outil en séance sur la base d'exemple proposés par l'équipe projet et discuter les dernières pistes d'amélioration sur la base de cette première prise en main

Le troisième atelier a eu lieu le 24 septembre 2019 à Besançon (**Figure 13**). Des ordinateurs avec l'outil installé ont été fournis. Par petits groupes, les participants ont pu tester la version complète de l'interface par le biais d'un exercice test, toujours dans l'objectif, de pouvoir ensuite discuter des ultimes améliorations de l'outil, pour optimiser son appropriation lors de sa future diffusion. Après une présentation de l'interface, les acteurs ont pu la prendre en main et découvrir l'outil concrètement. Des améliorations à apporter à l'interface ont été discutées collectivement, de même que les limites fixées en termes de faisabilité pour cette première version de l'outil dans le cadre du projet 2018-2020.



Figure 13 : Troisième et dernier atelier de travail du projet ERC-Lynx le 24/09/2019 à Besançon (Crédit photo : Cerema Est).

Objectifs de l'atelier n°3

- Présenter une version complète de l'interface pour discussions et échanges
- Identifier les problèmes et améliorations possibles avant sa diffusion

Ordre du jour de l'atelier n°3

1. Introduction
2. Rappels sur le modèle et présentation de l'interface
3. Familiarisation avec l'interface sur un scénario fictif écrit par l'équipe projet
4. Test de l'interface en libre
5. Discussions et échanges
6. Conclusion, retour sur la journée et perspectives

Discussions sur l'interface

Les points positifs formulés ont été :

- Une prise en main de l'interface, visuel très apprécié.
- Un outil simple d'utilisation et complet.
- Une aisance même pour personnes peu voire non technophiles.
- La possibilité de tester plusieurs scénarios.
- La possibilité de tester des effets cumulés.

Les points négatifs formulés ont été :

- Une interprétation difficile des résultats avec la possibilité d'interpréter un même résultat de plusieurs manières différentes selon les connaissances/utilisateurs/buts recherchés/etc.
- Une certaine lenteur est constatée : cartes lentes à afficher (cartes des routes et paysages), modèle lent pour obtenir les résultats finaux sur l'effet du/des scénarios sur la conservation de la population de lynx. Cela peut être problématique dans le cas où l'on souhaite tester plusieurs scénarios.
- Des confusions dans l'usage de certaines fonctions comme « Mettre à jour la carte » et « Carte modifiée ».
- La non prise en compte des lignes de chemin de fer qui sont des barrières aux mouvements et de réels risques de collisions.
- Un manque de confort sur la navigation.

Les craintes formulées ont été :

- Le non fonctionnement de l'outil dans les zones où il y a peu de lynx (ex : Massif des Vosges)
- Des doutes sur les échelles des résultats (à revoir peut-être).
- La pérennisation et la mise à jour de l'outil (cartes utilisées pour les modèles p.ex.).
- L'utilisation de l'outil pour une aide à l'artificialisation des sols : la Compensation est toujours plus utilisée que l'Évitement ou la Réduction dans les projets.
- L'interprétation des résultats (cf point précédent).

Les améliorations souhaitées ont été :

- Consignes d'utilisation :
 - o Avoir les instructions de l'interface dans un « manuel d'utilisation » en format pdf en plus des instructions disponibles dans l'interface (pas en remplacement).
 - o Traduire les options des outils de dessin sur les cartes (outils pour tracer les polygones, lignes et points) en français (en anglais en ce moment).
 - o Pouvoir cacher les instructions sur l'interface. Exemple : avoir une bulle « Aide » avec les instructions que l'on peut ouvrir seulement si l'on souhaite voir les instructions. Ne pas avoir le texte d'instructions d'affiché en permanence.
 - o Avoir un tutoriel/MOOC pour l'utilisation de l'interface.
- Sortie des résultats au niveau des résultats des cartes de probabilités de collisions, de qualité d'habitat et de catégories d'habitat du lynx :
 - o Avoir la carte d'origine pour toute l'aire d'étude avec la carte d'origine zoomée sur la zone de modification (à rajouter) et la carte modifiée zoomée sur la zone de modification (même zoom carte d'origine et carte modifiée).

- Modifier les couleurs de la légende des résultats du modèle final car elles sont trop connotées (ex : rouge/orange connoté négatif). Trouver des couleurs plus neutres. Attention aux daltoniens.
- Accompagner les résultats du modèle « Collision – Lynx - Viabilité » d'une interprétation avec du texte ou des symboles (ex : smileys, notes, feu tricolore, etc.)
- Manipulation de l'interface :
 - Pouvoir annuler la dernière action seulement et pas toutes les modifications par grand onglet (suppression d'un polygone mal réalisé/localisé).
 - Pouvoir rechercher/zoomer sur la carte en recherchant par nom de ville/commune/etc. plutôt que de le faire à la main sur la carte.
 - Le bouton « Mettre à jour la carte » supprime les polygones et les routes créées sur la carte du réseau actuel. Renommer/relocaliser le bouton pour éviter sa mauvaise utilisation ? Empêcher la suppression des routes créées sur la carte du réseau actuel ? Modifier le bouton pour éviter sa confusion avec la carte modifiée.
 - Avoir un processus plus guidé étape par étape. Confusion dans l'ordre des étapes parfois.
- Design de l'interface :
 - Modifier la mise en page des onglets avec les cartes à modifier pour avoir les boutons de modifications (ex : supprimer un segment, modifier le type d'un segment, etc.) sur le côté de la carte plutôt qu'en dessous pour ne pas avoir à descendre la page tout le temps.
 - Changer la sémantique dans l'onglet sur les populations de lynx. Ne pas utiliser « supprimer l'individu » mais « supprimer le point ».
 - Montrer (quelque part) la carte avec toutes les modifications faites dans les différents onglets, cumulés les uns sur les autres (ex : montrer la modification des routes superposée avec la modification du couvert paysage avec la modification des populations de lynx). Revoir le placement des boutons et le nom des boutons.
 - Afficher un message pendant l'affichage (lent) des cartes pour informer que l'interface n'a pas planté.

1.5. Un webinaire de restitution

Une journée de restitution du projet ERC-Lynx a été organisé sous forme de webinaire le 4 juin 2021 (voir **Figure 14** pour le programme). A cette occasion environ 70 participants ont pu bénéficier de présentations de l'équipe projet, du Ministère de la Transition Écologique ainsi que des DREAL Bourgogne Franche Comté et Grand Est pour, respectivement, la Plan National d'Actions en faveur du lynx en France et le Plan Régional d'Actions en faveur du lynx dans le Massif des Vosges. Les temps d'échanges ont été riches et enrichissants. Pour plus de détails sur le déroulé et le contenu de cette journée, se référer aux actes de la journée de restitution en **ANNEXE 1**.

**JOURNEE
DE
RESTITUTION**

Le 04 juin 2021

PROJET ERC-Lynx
2018-2021

**Éviter, réduire et compenser la mortalité
du Lynx par collision avec les véhicules de
transport terrestres**

© S. GATTI

Pour participer au webinaire : <https://www.gotomeet.me/ITTECOP>

Un temps d'accueil est prévu de 9h00 à 10h00 pour permettre de résoudre les éventuelles difficultés techniques rencontrées par les participants.

Renseignements : Alain MORAND | CEREMA Est | alain.morand@cerema.fr Emilie BUSSON | CEREMA Est | emilie.busson@cerema.fr

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Label TERRITOIRE D'EXCELLENCE

Cerema
CLIMAT & TERRITOIRES DE DEMAIN

OFB
OFFICE FRANÇAIS DE LA BIENNAVEUSE

Centre d'écologie fonctionnelle & évolutive

CROC

MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE
Label TERRITOIRE D'EXCELLENCE

FRB
FEDERATION DES RÉSEAU DE BIODIVERSITÉS

CIL&B
Club Infrastructures Lynx et Biodiversité

Programme • ITTECOP
Infrastructures de transport terrestres, écosystèmes et passagers

MATINEE	
9h00 - 10h00	Accueil des participants
10h00 - 10h10	Introduction par l'équipe projet CEFE-CNRS Olivier GIMENEZ CEREMA Luc CHRETIEN
10H10 - 10H20	Prise de parole Ministère de la Transition Ecologique (MTE) DEB Damien PACOU
10h20 - 11h00	Présentation PNA-PRA Lynx : les actions liées aux infrastructures de transport et intégration de l'outil ERC-Lynx PNA : DREAL BFC Marie-Pierre COLLIN-HUET PRA : DREAL GE Marine ARZUR CEREMA Alain MORAND <i>Tchat questions / réponses</i>
11h00-11h15	PAUSE
11h15 - 12h15	Présentation de l'outil ERC-Lynx CEFE-CNRS / OFB Sarah BAUDUIN Et l'Equipe Projet <i>Tchat questions / réponses</i>
APRES-MIDI	
13h45 - 15h00	Exemples d'utilisation de l'interface Equipe Projet <i>Tchat questions / réponses</i>
15h00 - 15h15	PAUSE
15h15 - 15h50	Bilan et suite pour le projet ERC-Lynx CEFE-CNRS Olivier GIMENEZ CEREMA Luc CHRETIEN <i>Tchat questions / réponses</i>
15h50 - 16h00	Clôture de la journée ITTECOP - MTE CGDD Yannick AUTRET
16h00	Fin de la journée

Figure 14 : Programme de la journée de restitution du Projet ERC-Lynx organisée sous forme de webinaire le 4 juin 2021.

Partie 2. L'outil, les modèles mathématiques sous-jacents et l'interface ergonomique

2.1. L'outil ERC-Lynx : quèsaco ?

a) Éviter, réduire et compenser le risque de mortalité du lynx par collision avec les véhicules de transport

De 2018 à 2020, le projet ERC-Lynx a permis de mettre en commun, compléter et exploiter les résultats de précédents travaux en lien avec la viabilité des populations de lynx observées en France, en Allemagne et en Suisse, les risques de collision lors du franchissement d'infrastructures de transports terrestres et les mesures correctrices.

En effet, les projets d'aménagement (qu'ils soient routiers ou bâti) sont autant susceptibles d'impacter, à plus ou moins long terme, la viabilité de ces populations de lynx. Or, actuellement, les services en charge de réaliser l'évaluation environnementale et d'appliquer la séquence Éviter-Réduire-Compenser³ (ERC) pour un projet d'aménagement où le lynx est potentiellement présent, s'appuient uniquement sur une analyse à dire d'expert à l'échelle locale.

Dans ce contexte, le projet ERC-Lynx a abouti à la création de **l'outil ERC-Lynx** qui permet d'évaluer l'effet de tels projets d'aménagements à l'horizon de 50 ans sur les populations de lynx observées en France. Il permet aussi de comparer les effets positifs de mesures d'évitement (ex : recherche d'un nouveau tracé), de réduction (ex : création d'un éco-pont) ou de compensation (ex : conversion de terres exploitées en habitats forestiers).

Ce projet de recherche appliquée à portée opérationnelle a rassemblé un ensemble diversifié d'acteurs (publics et privés, chercheurs, gestionnaires d'espaces naturels et spécialistes des carnivores, gestionnaires d'infrastructures et spécialistes en charge de l'ingénierie des routes et de la planification des transports, etc.) autour d'une espèce protégée, le lynx, et d'une problématique à enjeu de conservation élevé, l'aménagement du territoire. L'aménagement du territoire peut modifier la quantité, la répartition et la connectivité des habitats favorables au lynx ainsi que le risque de mortalité pour cette espèce au travers des collisions avec les véhicules de transport.

b) Un outil d'aide à la décision

L'outil ERC-Lynx est un outil innovant et robuste visant à renforcer la mise en œuvre de politiques publiques d'aménagement du territoire telle que la Trame Verte et Bleue et ses déclinaisons régionales. Le déploiement d'un tel outil constitue une aide à la décision dans le choix, la localisation et/ou l'entretien de mesures correctrices prioritaires sur lesquelles orienter les efforts d'aménagement et de financement.

Cet outil repose sur un modèle mathématique nommé *Lynx-Collision-Habitat*. Il s'agit d'un modèle individu-centré spatialement explicite qui permet de quantifier une différence de viabilité pour les populations de lynx entre la situation initiale (en lien avec les données utilisées pour élaborer l'outil ; voir l'onglet **Description du modèle Lynx-Collision-Habitat**) et un scénario d'aménagement du territoire et/ou d'évolution des populations de lynx. Ce modèle reproduit la dispersion et la dynamique des populations de lynx tout en incluant l'effet des routes et du paysage. Sont représentées dans le modèle les populations de lynx française et suisse rattachées à la population Alpine, ainsi que les populations de lynx composant la métapopulation du Rhin Supérieur à savoir : la population jurassienne (France, Suisse), la population vosges-palatine (France, Allemagne) et la population de la Forêt Noire et du Jura Souabe (Allemagne).

³ Pour plus d'informations sur la séquence ERC, rendez-vous sur le site du [Ministère de la transition écologique](#) ou du [CEREMA](#).

2.2. Une interface accessible à tous

ERC-Lynx Projet Modifier le réseau routier Modifier le paysage Modifier les populations de lynx Tester le scénario créé Description du modèle Lynx-Collision-Habitat

Éviter, réduire et compenser le risque de mortalité du lynx par collision avec les véhicules de transport

De 2018 à 2020, le [projet ERC-Lynx](#) a permis de mettre en commun, compléter et exploiter les résultats de précédents travaux en lien avec la viabilité des populations de lynx boréal (*Lynx lynx*) observées en France, en Allemagne et en Suisse, les risques de collision lors du franchissement d'infrastructures de transports terrestres et les mesures correctrices.

En effet, les projets d'aménagement (qu'ils soient routiers ou bâti) sont autant susceptibles d'impacter, à plus ou moins long terme, la viabilité de ces populations de lynx. Or, actuellement, les services en charge de réaliser l'évaluation environnementale et d'appliquer la séquence Éviter-Réduire-Compenser* (ERC) pour un projet d'aménagement où le lynx est potentiellement présent, s'appuient uniquement sur une analyse à dire d'expert à l'échelle locale.

Dans ce contexte, le projet ERC-Lynx a abouti à la création de l'outil ERC-Lynx qui permet d'évaluer l'effet de tels projets d'aménagements à l'horizon de 50 ans sur les populations de lynx observées en France. Il permet aussi de comparer les effets positifs de mesures d'évitement (ex : recherche d'un nouveau tracé), de réduction (ex : création d'un éco- pont) ou de compensation (ex : conversion de terres exploitées en habitats forestiers).

Ce projet de recherche appliquée à portée opérationnelle a rassemblé un ensemble diversifié d'acteurs (publics et privés, chercheurs, gestionnaires d'espaces naturels et spécialistes des carnivores, gestionnaires d'infrastructures et spécialistes en charge de l'ingénierie des routes et de la planification des transports, etc.) autour d'une espèce protégée, le lynx, et d'une problématique à enjeu de conservation élevé, l'aménagement du territoire. L'aménagement du territoire peut modifier la quantité, la répartition et la connectivité des habitats favorables au lynx ainsi que le risque de mortalité pour cette espèce au travers des collisions avec les véhicules de transport.

* Pour plus d'informations sur la séquence ERC, rendez-vous sur le site du [Ministère de la transition écologique](#) ou du [CEREMA](#).



L'un des enjeux majeurs du développement de l'outil ERC-Lynx est de pouvoir le mettre à disposition librement pour un usage ne nécessitant aucune connaissance préalable en modélisation ou en informatique. Dans cet objectif, la présente interface permet d'utiliser l'outil ERC-Lynx grâce à quatre onglets :

L'onglet **Modifier le réseau routier** : il permet de tester des scénarios d'aménagement au niveau du réseau routier. Ces modifications vont impacter le risque de collision entre le lynx et les véhicules de transport et, par conséquence, la survie des individus. L'outil permet de créer, modifier le type ou supprimer un segment routier, ainsi que de créer un passage à faune.

L'onglet **Modifier le paysage** : il permet de tester des scénarios d'aménagement du paysage. Ces modifications vont impacter la qualité d'habitat du lynx et, par conséquence, la distribution des individus dans le paysage. L'outil permet de modifier le type de couvert paysager.

L'onglet **Modifier les populations de lynx** : il permet de tester des scénarios d'évolution des populations de lynx. L'outil permet de retirer, déplacer ou ajouter des individus dans les différentes populations.

L'onglet **Tester le scénario créé** : il permet d'exécuter le modèle *Lynx-Collision-Habitat* qui simule le devenir des populations de lynx à l'horizon de 50 ans avec votre scénario d'aménagement (scénario qui inclut toutes les modifications effectuées dans les trois précédents onglets). Les résultats obtenus expriment la différence (en pourcentage) entre la situation initiale (c'est-à-dire, avec le réseau routier, le paysage et les populations de lynx comme lors de la conception de l'outil ERC-Lynx) et le scénario créé par l'utilisateur, pour les quatre indices de viabilité suivants :

- L'évolution du nombre de collision entre lynx et véhicule,
- L'évolution du taux d'occupation du territoire par des femelles lynx résidentes,
- L'évolution du nombre de passages de lynx en dispersion,
- L'évolution de la densité de lynx.

Enfin, le dernier onglet **Description du modèle Lynx-Collision-Habitat** détaille les paramètres biologiques utilisés dans le modèle *Lynx-Collision-Habitat*, ainsi que le fonctionnement des différentes composantes du modèle (la reproduction du lynx, la dispersion des jeunes, l'établissement de nouveaux territoires, et les différentes sources de mortalité touchant les individus). Aucune modification des composantes du modèle (valeurs des paramètres et fonctionnement du modèle) n'est possible dans la mesure où ces composantes

s'appuient sur les éléments de connaissances actuellement disponibles dans la littérature scientifique concernant la biologie du lynx. La lecture et la compréhension de cet onglet ne sont pas indispensables au bon usage de l'outil.

L'onglet « Modifier le réseau routier »

The screenshot shows the top navigation bar with tabs: ERC-Lynx, Projet, Modifier le réseau routier (which is highlighted in blue), Modifier le paysage, Modifier les populations de lynx, Tester le scénario créé, and Description du modèle Lynx-Collision-Habitat. Below the navigation bar, there is a secondary row of buttons: Description, Modifier le paysage actuel (highlighted in green), Visualiser le paysage modifié, and Générer la nouvelle qualité d'habitat. A note at the bottom of the interface states: "Certains types de couverts paysagers (forestier, arbustif, etc.) ont des effets positifs ou négatifs sur la présence du lynx et donc impactent la survie de ses populations. L'objectif ici est donc de tester l'effet d'aménagements du paysage sur l'habitat du lynx (modification des différents types de couverts paysagers)."

Le réseau routier impacte la survie du lynx par le biais de collision avec les véhicules de transport. L'objectif ici est donc de tester l'effet d'aménagements du réseau routier sur les risques de collision entre lynx et véhicules de transport (modification de la répartition et du type des routes, ajout de passages à faune).

Dans l'onglet **Modifier le réseau routier**, l'usager peut :

- Modifier la présence et le type de segments routiers.
- Ajouter un(des) passage(s) à faune.

Le scénario d'aménagement routier doit être composé avec ces actions seulement. Aucune autre ne peut être testée avec cette version actuelle de l'outil ERC-Lynx.

Une fois les modifications apportées sur le réseau routier :

- L'étape **Visualiser le réseau routier modifié** permet de visualiser le scénario d'aménagement routier.
- L'étape **Générer le nouveau risque de collision** permet de générer les nouvelles probabilités de collision entre lynx et véhicule, incluant le scénario d'aménagement routier. Ces probabilités sont estimées automatiquement par le modèle de collision lynx-véhicule (voir onglet. **Description du modèle Lynx-Collision-Habitat**).
- Ces étapes sont indispensables.

Limites d'action actuelles de l'outil sur le réseau routier :

- Les cartes et modèles utilisés sont à une résolution de 1 km². Tout aménagement plus petit que 1 km de long n'aura probablement pas d'effet visible sur les populations de lynx.
- Le réseau ferroviaire ne peut pas être modifié avec l'outil ERC-Lynx. **L'effet de la création ou de la requalification de voies de chemin de fer sur les populations de lynx ne peut donc pas être testé.**
- La présence des passages à faune d'ores et déjà existants n'a pas pu être incluse dans le modèle de collision lynx-véhicule faute de base de données stabilisée et disponible à cette échelle de travail. Pour autant, l'outil ERC-Lynx permet de créer des passages à faune et de tester leur effet. **Il faut donc garder à l'esprit que les résultats présentés ne tiendront pas compte de l'existence éventuelle de passages à faune déjà présents sur votre zone d'étude.**
- Les différents types de clôtures, notamment le long des routes de part et d'autre des passages à faune, ne sont pas inclus dans le modèle d'habitat du lynx faute de base de données stabilisée et disponible à cette échelle de travail. **Ces équipements ne sont donc pas disponibles pour modification dans l'interface et leur impact sur les populations de lynx ne peut être testé.**

Pour plus de détails, voir l'onglet **Description du modèle Lynx-Collision-Habitat**.

Attention, le modèle de collision inclut aussi l'effet de la présence humaine (voir l'onglet **Description du modèle Lynx-Collision-Habitat**). Ainsi, si l'usager souhaite modifier le paysage, notamment les zones de présence humaine, il lui faudra d'abord effectuer les modifications voulues dans l'onglet **Modifier le paysage** afin de générer les nouvelles cartes de qualité du paysage et des différents habitats du lynx. Puis,

dans un deuxième temps, générer la nouvelle carte de probabilités de collision (avec ou sans modifications complémentaires du réseau routier) dans l'onglet **Modifier le réseau routier**. De cette façon, ces modifications du paysage seront bien prises en compte dans le calcul des nouvelles probabilités de collision.

L'onglet « **Modifier le paysage** »

The screenshot shows the top navigation bar with tabs: ERC-Lynx, Projet, Modifier le réseau routier, **Modifier le paysage**, Modifier les populations de lynx, Tester le scénario créé, and Description du modèle Lynx-Collision-Habitat. Below this, a secondary row of buttons includes: Description, Modifier le réseau routier, Visualiser le réseau routier modifié, and Générer le nouveau risque de collision. A note at the bottom states: "Le réseau routier impacte la survie du lynx par le biais de collision avec les véhicules de transport. L'objectif ici est donc de tester l'effet d'aménagements du réseau routier sur les risques de collision entre lynx et véhicules de transport (modification de la répartition et du type des routes, ajout de passages à faune)."

Certains types de couverts paysagers (forestier, arbustif, etc.) ont des effets positifs ou négatifs sur la présence du lynx et donc impactent la survie de ses populations. L'objectif ici est donc de tester l'effet d'aménagements du paysage sur l'habitat du lynx (modification des différents types de couverts paysagers).

Dans l'onglet **Modifier le paysage**, l'usager peut modifier la répartition spatiale des différents types de couverts paysagers de la carte proposée par l'outil afin de créer votre scénario de modification du paysage. **Le scénario d'aménagement du paysage est composé avec cette action seulement.** Aucune autre ne peut être testée avec cette version actuelle de l'outil ERC-Lynx.

Une fois les modifications apportées sur le paysage :

- L'étape **Visualiser le paysage modifié** permet de visualiser le scénario d'aménagement du paysage.
- L'étape **Générer la nouvelle qualité d'habitat** permet de générer les nouvelles cartes de qualité du paysage et des différents habitats du lynx, incluant le scénario d'aménagement, qui seront estimées automatiquement par le modèle d'habitat pour le lynx (voir onglet. **Description du modèle Lynx-Collision-Habitat**).
- Ces étapes sont indispensables.

Limites d'action actuelles de l'outil sur le paysage :

- Les cartes et modèles utilisés sont à une résolution de 1 km². Tout aménagement plus petit que 1 km² n'aura probablement pas d'effet visible sur les populations de lynx.

Pour plus de détails, voir l'onglet **Description du modèle Lynx-Collision-Habitat**.

Attention, le modèle d'habitat inclut aussi l'effet de la distance à l'autoroute la plus proche (voir l'onglet **Description du modèle Lynx-Collision-Habitat**). Ainsi, si l'usager souhaite modifier le réseau routier, notamment la présence des autoroutes, effectuez d'abord vos modifications dans l'onglet **Modifier le réseau routier** afin de générer le nouveau risque de collision entre lynx et véhicule. Puis, dans un deuxième temps, générer les nouvelles cartes de qualité du paysage et d'habitats du lynx (avec ou sans modifications complémentaires du couvert paysager) dans l'onglet **Modifier le paysage**. De cette façon, ces modifications du réseau routier seront bien prises en compte dans le calcul de la nouvelle qualité du paysage et des nouveaux habitats.

L'onglet « Modifier les populations de lynx »

ERC-Lynx Projet Modifier le réseau routier Modifier le paysage **Modifier les populations de lynx** Tester le scénario créé Description du modèle Lynx-Collision-Habitat

Description **Modifier les populations** Visualiser les populations modifiées

L'effectif des populations de lynx va avoir un effet sur la survie des populations à l'avenir. L'objectif ici est donc de tester l'effet de modification des populations de lynx (modification du nombre de lynx estimé au moment de l'élaboration de l'outil ERC-Lynx).

L'effectif des populations de lynx va avoir un effet sur la survie des populations à l'avenir. L'objectif ici est donc de tester l'effet de modification des populations de lynx (modification du nombre de lynx estimé au moment de l'élaboration de l'outil ERC-Lynx).

Dans l'onglet **Modifier les populations**, l'usager peut ainsi modifier le nombre de lynx dans les populations initiales de l'outil (en lien avec les données utilisées pour élaborer l'outil ; voir l'onglet **Description du modèle Lynx-Collision-Habitat**). En ajoutant de nouveaux individus, en en retirant ou en déplaçant pour créer un scénario d'évolution des populations, l'étape **Visualiser les populations modifiées** permet de visualiser les changements apportés par l'usager.

L'onglet « Tester le scénario créé »

ERC-Lynx Projet Modifier le réseau routier Modifier le paysage Modifier les populations de lynx **Tester le scénario créé** Description du modèle Lynx-Collision-Habitat

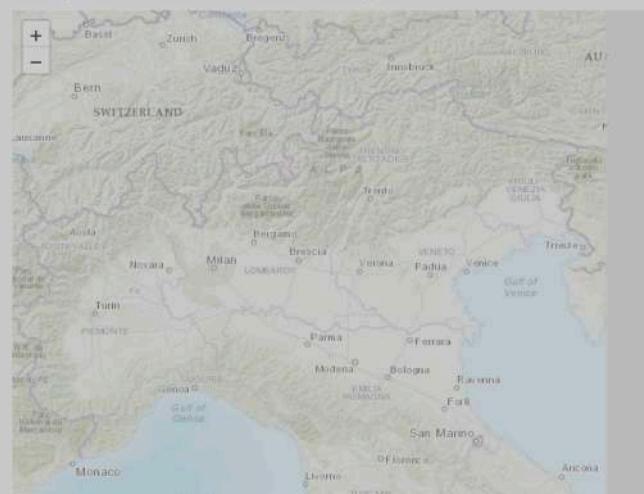
Test de votre scénario d'aménagement

L'objectif de cet onglet est de lancer le test de votre scénario d'aménagement suite aux modifications que vous avez pu apporter au réseau routier et/ou au paysage et/ou aux populations de lynx.

Montrer/Masquer les instructions

Scénario testé

Voici une synthèse des modifications qui vont être incluses dans le modèle Lynx-Collision-Habitat pour tester l'effet de votre scénario d'aménagement sur la viabilité des populations de lynx. Merci de bien vérifier que cela est conforme à votre scénario d'aménagement.



The map shows the Alpine region, including parts of Switzerland, Italy, and Austria. It displays a network of roads and railways. A legend on the right side of the map details the types of changes made to the road network:

Légende des modifications faites sur le réseau routier :

- Nouvelles autoroutes
- Nouvelles routes principales
- Nouvelles routes secondaires
- Nouvelles routes locales
- Routes supprimées
- Nouveaux passages à faune

Légende des modifications faites sur le paysage :

- Nouvelles forêts (de feuillus, de conifères, mélangées)
- Nouvelles prairies (et autres surfaces toujours en herbe à usage agricole)
- Nouveaux espaces ouverts (plages, dunes, sable, roches nues, végétation clairsemée, zones incendiées, glaciers, neiges éternnelles)
- Nouvelles terres arables (irriguées et non irriguées)
- Nouvelles cultures permanentes (vignobles, vergers, petits fruits, oliveraies)
- Nouvelle présence humaine (zones urbaines, industrielles et commerciales, installations publiques, réseaux routier et ferroviaire avec espaces associés, zones portuaires, aéroports, extraction de minéraux, décharges, chantiers, espaces verts urbains, équipements sportifs et de loisirs)
- Nouvelles eaux (cours et voies d'eau, plans d'eau, lagunes littorales, estuaires, mers, océans)
- Autres modifications

L'objectif de cet onglet est de lancer le test du scénario d'aménagement créé suite aux modifications apportées par l'usager au réseau routier et/ou au paysage et/ou aux populations de lynx.

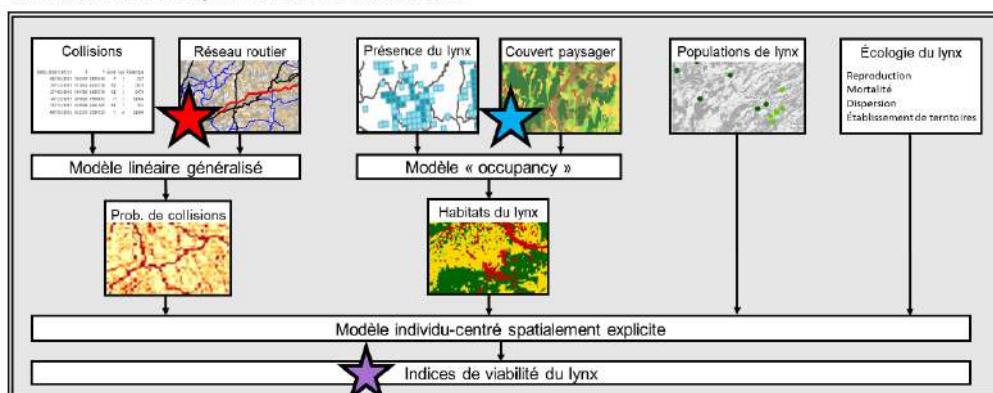
2.3. Description du modèle Lynx-Collision-Habitat sous-jacent à l'outil

Cet outil repose sur un modèle mathématique nommé « Lynx-Collision-Habitat ». Il s'agit d'un modèle individu-centré spatialement explicite qui simule le devenir des populations de lynx et permet par la suite de quantifier une différence de viabilité pour la population de lynx entre la situation initiale (**Figure 15**) et un scénario d'aménagement du réseau routier et/ou du paysage. Ce modèle reproduit la dispersion et la dynamique des populations de lynx tout en incluant l'effet des routes et du paysage. Sont représentées dans le modèle les populations française et suisse rattachées à la population Alpine ainsi que les populations de lynx composant la métapopulation du Rhin Supérieur à savoir : la population jurassienne (France, Suisse), la population Vosges-Palatinat (France, Allemagne) et la population de la Forêt Noire (Allemagne).

Le modèle simule le devenir de ces populations à l'horizon de 50 ans avec le scénario d'aménagement créé par l'utilisateur. Les résultats de simulations obtenus et fournis à l'utilisateur expriment la différence (en pourcentage) entre la situation initiale et le scénario testé, pour les quatre indices de viabilité suivants :

- L'évolution du nombre de collision entre lynx et véhicules,
- L'évolution du taux d'occupation du territoire par des femelles lynx résidentes,
- L'évolution du nombre de passages de lynx en dispersion,
- L'évolution de la densité de Lynx.

MODÈLES STATISTIQUES ET INDIVIDU-CENTRÉ :



MODÈLE PRÉDICTIF :
Combinaison de plusieurs couches de données et de règles statistiques et individu-centrées pour prédire la viabilité du lynx.

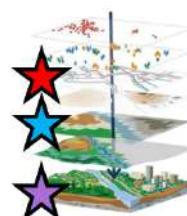


Figure 15 : Schéma illustrant la construction du modèle Lynx-Collision-Habitat sous-jacent à l'outil ERC-Lynx.

a) Détails du modèle de collision lynx-véhicule

Visintin et al. (2017) considèrent le **volume du trafic et sa vitesse** comme des facteurs permettant d'expliquer les risques de collision entre animaux et véhicules de transport. Compte tenu de l'impossibilité d'obtenir des mesures de ces variables sur l'aire de présence des populations de lynx prises en compte, les proxys proposés par Visintin et al. (2017) ont été utilisés pour représenter ces deux composantes (volume du trafic et vitesse), à savoir : **la présence de zones urbaines, le type de segments routiers présents (autoroutes, routes principales, routes secondaires et routes locales) ainsi que leurs longueurs**. Ces variables sont disponibles pour l'ensemble de l'aire de présence des populations de lynx et ont été utilisées dans un modèle de régression logistique pour prédire le **risque de collision entre lynx et véhicule**.

Points de vigilance :

- Le réseau ferroviaire :

Compte tenu de leur faible nombre, les collisions entre lynx et trains n'ont pas été incluses dans le modèle. Le réseau ferroviaire ne peut donc être modifié avec l'outil ERC-Lynx et son impact sur les populations de lynx ne peut être testé.

- Les passages à faune :

La présence de passages à faune n'a pas pu être incluse dans le modèle de collision lynx-véhicule faute de base de données stabilisée et disponible à cette échelle de travail. **Il faut donc garder à l'esprit que les résultats présentés ne tiendront pas compte de l'existence éventuelle de passages à faune déjà présents sur votre zone d'étude.** Pour autant, l'outil ERC-Lynx permet de créer des passages à faune et tester leur effet. La création d'un passage à faune se traduira sur le réseau routier de la façon suivante :

1. La suppression d'un segment routier 500 mètres de part et d'autre du point de création du passage à faune (1 km en tout). Si plusieurs segments routiers sont à proximité du passage à faune créé, c'est le segment de route le plus proche qui est supprimé. Pour les autoroutes, la suppression du segment de 1 km aura aussi automatiquement un impact sur l'habitat du lynx étant donné que la présence des autoroutes est incluse dans le modèle d'habitat du lynx (voir paragraphe *Détails du modèle d'habitat du lynx*).
2. L'annulation de la mortalité due aux collisions routières dans la cellule de 1 km² incluant le passage à faune créé. En effet, l'effet d'un passage à faune ainsi que des clôtures qui l'entourent en théorie, peut raisonnablement annuler la probabilité de collision pour un lynx sur une cellule de 1 km².

b) Détails du modèle d'habitat du lynx

Un modèle *d'occupancy* dynamique a été utilisé pour décrire l'habitat du lynx en s'appuyant sur les analyses développées par Louvrier et al. (2018). Les données de présence de lynx du Réseau Loup-Lynx de l'OFB (ex-ONCFS) de 1994 à 2016 ont été utilisées, associées à des variables environnementales. Dans la continuité des travaux de Basille et al. (2008) et Zimmermann & Breitenmoser (2007) qui ont testé de nombreuses variables environnementales pour expliquer la présence du lynx, **les variables suivantes ont été retenues pour construire le modèle d'habitat du lynx de l'outil ERC-Lynx :**

- Le couvert forestier, les prairies, les espaces ouverts, les terres agricoles,
- Les plans d'eaux,
- La présence humaine,
- La distance aux autoroutes.

Grâce à ce modèle, une carte de la qualité du paysage pour le lynx est générée sous forme de probabilités de présence dans des cellules de 1 km². Ces valeurs de probabilités sont ensuite classées en quatre catégories, représentant quatre habitats distincts pour le lynx :

- **L'habitat d'installation** : il s'agit d'un habitat de bonne qualité pour le lynx qui s'y déplace aisément et peut s'y installer et établir son territoire.
- **L'habitat de dispersion** : il s'agit d'un habitat de bonne qualité pour le lynx qui s'y déplace aisément mais ne peut en revanche pas s'y installer ni établir son territoire.
- **La matrice** : il s'agit d'un habitat de moindre qualité, le lynx peut s'y déplacer mais l'évite en premier lieu.
- **Les barrières** qui ne sont jamais traversées ou empruntées par un individu.

Points de vigilance :

- Les différents types de clôtures, notamment le long des routes de part et d'autre des passages à faune, ne sont pas inclus dans l'habitat *barrières* faute de base de données stabilisée et disponible à cette échelle de travail. Ces équipements ne sont donc pas disponibles pour modification dans l'interface et leur impact sur les populations de lynx ne peut être testé.

c) Détails de la création des populations théoriques initiales

Le nombre, la localisation des individus des différentes populations de lynx (Jura, Alpes, Vosges-Palatinat, Forêt Noire), ainsi que leur sexe et âge ne sont pas connus pour la plupart d'entre elles. Le modèle *Lynx-Collision-Habitat* a néanmoins besoin de ces données pour démarrer la simulation des populations. Des populations théoriques ont donc été créées à partir des données de terrain disponibles au moment de la création de l'outil.

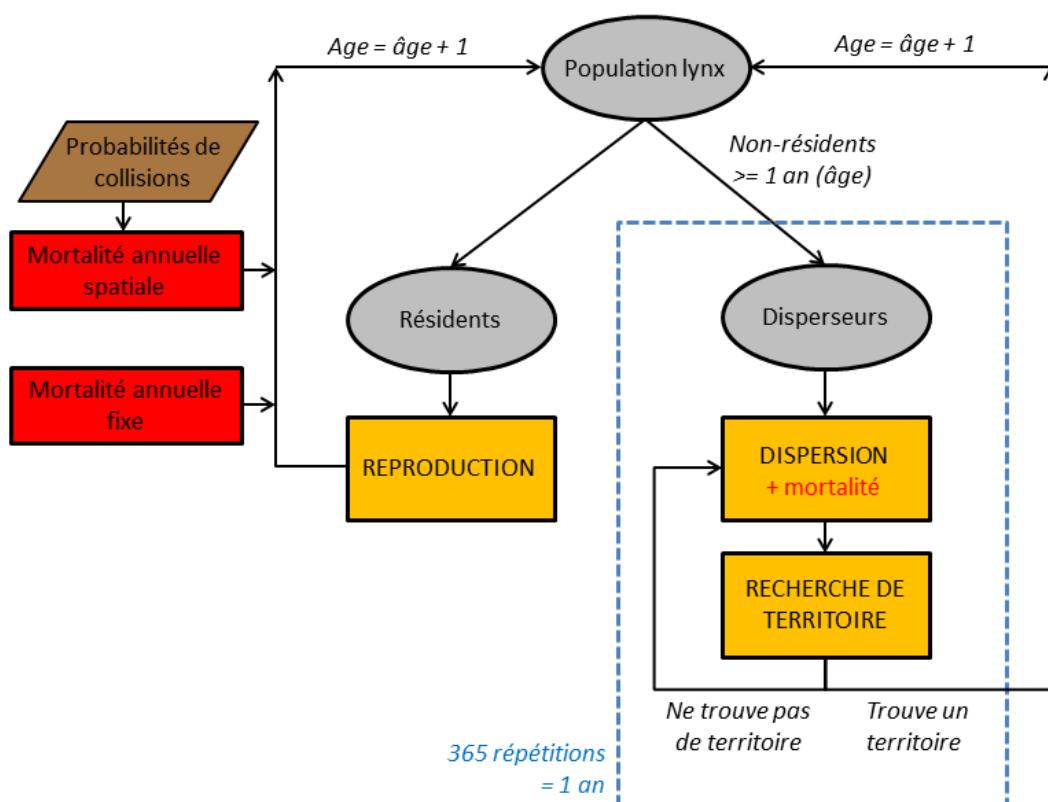
Les **zones de présence permanente du lynx** ont tout d'abord été collectées pour chacune des populations prises en compte (France : ONCFS Réseau Loup Lynx 2017 ; Suisse : KORA 2017 ; Allemagne : BfN 2017) ainsi que le **nombre d'individus ou la densité estimé** (France : Gimenez et al. 2019 ; Suisse : KORA 2017; Allemagne : BfN 2017 ; Stiftung Natur und Umwelt Rheinland-Pfalz 2019 ; Micha Herdtfelder comm. pers.). Dans le cas où seules les densités étaient disponibles, le nombre d'individus a été estimé par rapport à la densité locale et la surface de présence permanente de l'espèce.

Finalement, pour chacune des populations, autant de lynx que le nombre estimé théoriquement a été créé et placé dans les **habitats de bonne qualité**. Ces individus se sont vus attribuer un âge (entre 2 et 15 ans) et un sexe (mâle ou femelle) de manière aléatoire, excepté pour certaines populations lorsque le sexe et l'âge des individus étaient connus.

Pour rappel, l'**habitat de bonne qualité** est défini en utilisant la carte originale des habitats du lynx et en ne sélectionnant que les habitats d'installation et de dispersion (voir paragraphes ci-dessous sur les détails des modèles).

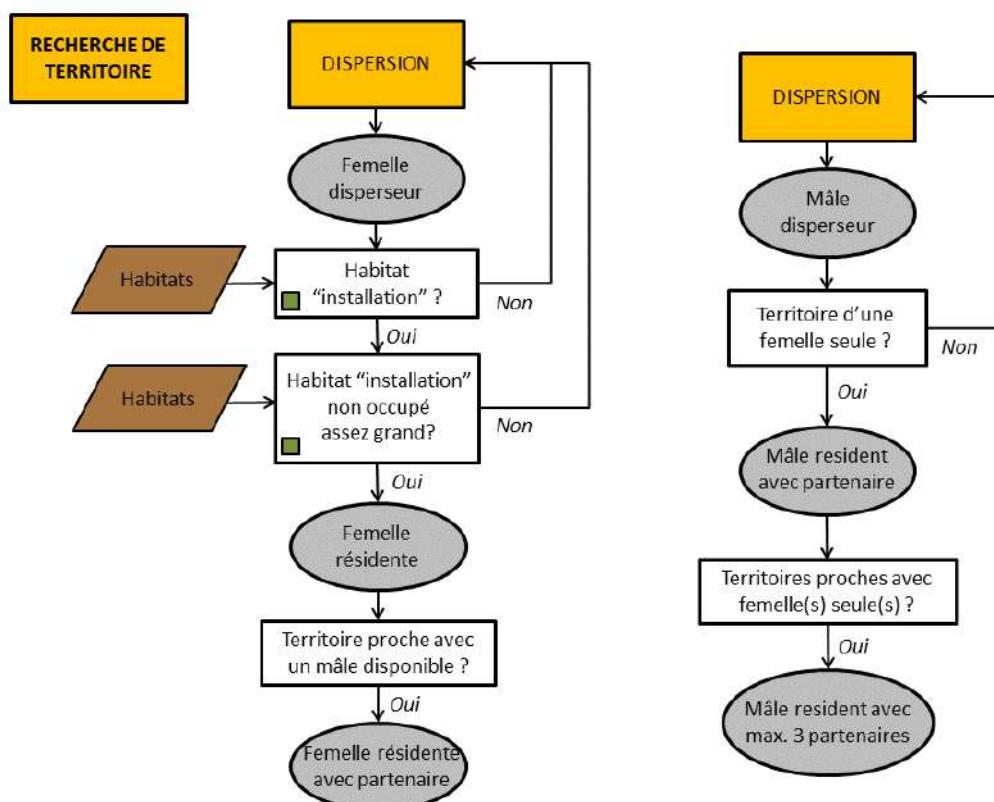
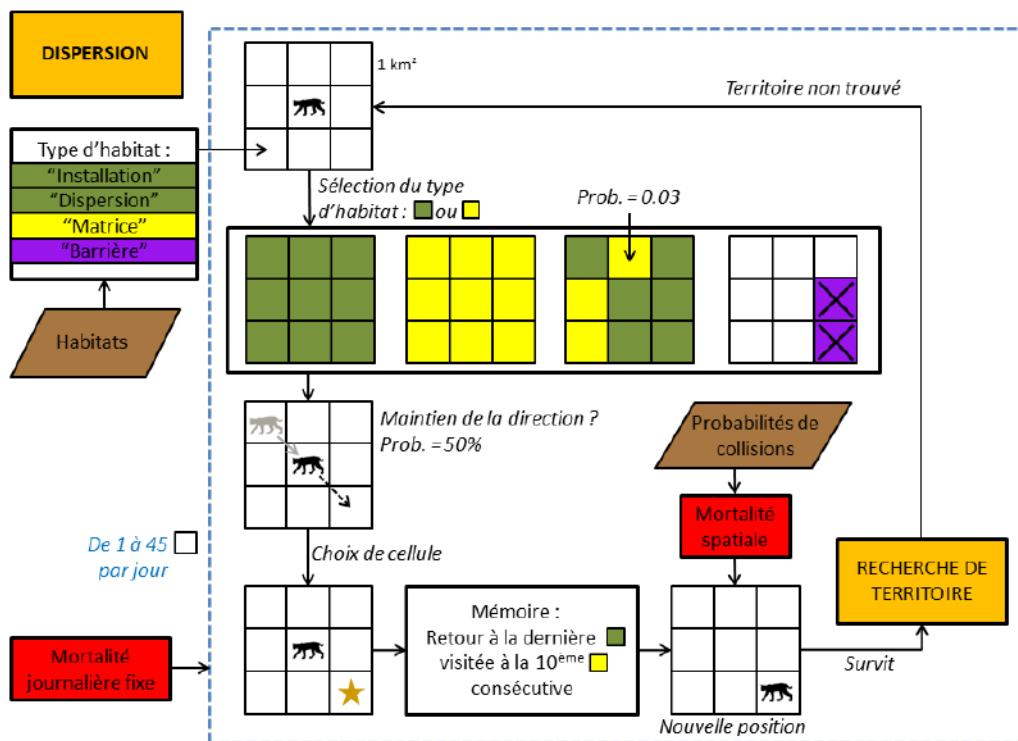
d) Modèle de simulation

- Structure générale



Un descriptif précis est disponible dans les appendix de l'**ANNEXE 2**.

- Détails des différentes parties



Un descriptif précis est disponible dans les appendix de l'**ANNEXE 2**.

e) Paramètres biologiques

- Mortalité
 - Mortalité annuelle des lynx résidents (sans les risques de collision) = 0.1 (Kramer-Schadt et al. 2005).
 - Mortalité journalière des lynx en dispersion (sans les risques de collision) = 0.0007 (Kramer-Schadt et al. 2004).
 - Âge maximal pour un lynx = 20 ans (von Arx et al. 2017).
- Reproduction
 - Probabilité de reproduction = 0.81 (Breitenmoser-Würsten et al. 2007a).
 - Âge minimum de reproduction pour toutes les femelles = 2 ans (3^{ème} année de vie). À 1 an (2^{ème} année de vie), seulement 50 % des femelles peuvent se reproduire (Breitenmoser-Würsten et al. 2007a, Kvam 1991, Henriksen et al. 2005).
 - Âge minimum de reproduction pour tous les mâles = 3 ans (4^{ème} année de vie). À 2 ans (3^{ème} année de vie), seulement 50 % des mâles peuvent se reproduire (Kvam 1991).
 - Nombre de jeunes produits par *jeunes femelles* survivants jusqu'à l'âge de dispersion = 1 ou 2 (avec une probabilité de 0.5 chacun) (Kramer-Schadt et al. 2005, Henriksen et al. 2005).
 - Nombre de jeunes produits par *vieilles femelles* survivants jusqu'à l'âge de dispersion = 0 ou 1 (avec une probabilité de 0.5 chacun) (Kramer-Schadt et al. 2005, Henriksen et al. 2005).
 - Âge maximal pour une femelle pour être considérée *jeune femelle* = 11 ans (Henriksen et al. 2005).
- Dispersion
 - Distance maximale de dispersion en un jour = 45 km (Kramer-Schadt et al. 2004).
 - Probabilité de se rendre dans un habitat de faible qualité (habitat *matrice*) = 0.03 (Kramer-Schadt et al. 2004).
 - Distance maximale parcourue dans un habitat de faible qualité (habitat *matrice*) = 9 km (Kramer-Schadt et al. 2004).
 - Probabilité de conserver la même direction de mouvement (corrélation) = 0.5 (Kramer-Schadt et al. 2004).
- Recherche de territoire
 - Taille minimum de territoire à établir pour une femelle de la population du Jura = 73 km² (Breitenmoser-Würsten et al. 2007b).
 - Taille minimum de territoire à établir pour une femelle de la population des Alpes = 43.5 km² (Breitenmoser-Würsten et al. 2001).
 - Taille minimum de territoire à établir pour une femelle de la population Vosges-Palatinat = 73 km² (Breitenmoser-Würsten et al. 2007b).
 - Taille minimum de territoire à établir pour une femelle de la population de la Forêt Noire = 73 km² (Breitenmoser-Würsten et al. 2007b).
 - Taille maximum de territoire pour un mâle de la population du Jura = 226 km² (Breitenmoser-Würsten et al. 2007b).

- Taille maximum de territoire pour un mâle de la population des Alpes = 137 km² (Breitenmoser-Würsten et al. 2001).
- Taille maximum de territoire pour un mâle de la population Vosges-Palatinat = 226 km² (Breitenmoser-Würsten et al. 2007b).
- Taille maximum de territoire pour un mâle de la population de la Forêt Noire = 226 km² (Breitenmoser-Würsten et al. 2007b).
- Nombre maximal de territoires femelles qu'un mâle peut occuper = 3 (Kramer-Schadt et al. 2005).

2.5. Perspectives d'utilisation

L'outil ERC-Lynx est un outil innovant et robuste visant à renforcer la mise en œuvre de politiques publiques d'aménagement du territoire telle que la Trame Verte et Bleue et ses déclinaisons régionales (Schéma Régional Cohérence Ecologique / Schéma Régional d'Aménagement, de Développement durable et d'Egalité du Territoire). Le déploiement d'un tel outil constitue une aide à la décision dans le choix, la localisation et/ou l'entretien de mesures correctrices prioritaires sur lesquelles orienter les efforts d'aménagement et de financement.



Figure 16 : Travaux en cours sur l'amélioration de l'outil et son intégration dans le cadre des démarches de travail du Plan National d'Actions en faveur du lynx en France, du Plan Régional d'Action en faveur du lynx dans le Massif des Vosges et dans la démarche ERC-Lynx.

L'un des enjeux majeurs du développement de l'outil ERC-Lynx est de pouvoir **le mettre à la disposition des acteurs du territoire pour un usage ne nécessitant aucune connaissance préalable en modélisation ou en informatique**. Dans cet objectif, l'outil ERC-Lynx sera accessible fin 2021/début 2022 sur un serveur dédié sous la gestion de l'Office Français de la Biodiversité. Cet outil devrait faire l'objet à l'avenir d'améliorations dans le cadre du futur Plan National d'Action en faveur du lynx en France et de sa déclinaison régionale, dans le Massif des Vosges. Des échanges de travail sont en cours avec la DREAL Bourgogne Franche Comté et la DREAL Grand Est quant à l'intégration de l'outil dans la démarche ERC (**Figure 12**). Ainsi, comme cela a été expliqué en introduction, l'outil ERC-Lynx répond à un enjeu de conservation majeur pour la conservation de l'espèce en France. Dans le cadre des plans d'actions, des formations devraient être dispensées. De plus, afin d'aider l'utilisateur dans la lecture et l'exploitation des résultats obtenus grâce à l'outil ERC-Lynx, un document décrivant l'impact de leur scénario d'aménagement sur les quatre indices de viabilité du lynx est envoyé en fin d'analyse. Il est recommandé de tester plusieurs scénarios pour voir leurs

impacts comparés à la situation initiale mais aussi pour étudier la différence d'impact entre ces différents scénarios d'aménagement. De tels documents peuvent ensuite contribuer à la prise de décision concernant les aménagements à engager ainsi que la mise en place de mesures correctrices éventuelles dans les zones de présence du Lynx.

Points de vigilance

- ☒ L'outil ERC-Lynx permet d'évaluer l'impact d'aménagements du territoire sur l'état de conservation du lynx en France et d'aider la prise de décision.
- ☒ Il ne donne pas de réponse clé en main.
- ☒ Il compare des projets, leurs impacts sur la viabilité des populations de Lynx, et accompagne l'utilisateur dans le choix du projet le moins impactant.

Partie 3. Apports des travaux réalisés par les stages de Master 2

Olivier C.-A. 2018 / Stage de Master 2 / École Pratique des Hautes Études (EPHE) de Paris, Master Biodiversité et Gestion de l'Environnement – Axe Écologie continentale en voie Recherche. Sujet : Étude comparative de différentes méthodes de modélisation de corridors écologiques pour le Lynx boréal en France. Co-encadrée par A. Charbonnel (CROC), E. Germain (CROC), O. Gimenez (CEFE) et Aurélie Coulon (CEFE).

Olivier C.-A. 2018. Étude comparative de différentes méthodes de modélisation de corridors écologiques pour le Lynx boréal en France. Soutenance de Master 2 réalisé au CROC en collaboration avec le CNRS CEFE, le 6 septembre 2018, École Pratique des Hautes Études, Paris (75), France. *Communication orale*

Le rapport complet est disponible en **ANNEXE 3**.

Extraits du rapport et de la soutenance de stage de Charlotte-Anaïs Olivier.

Les perturbations naturelles ou anthropiques génèrent des changements dans la structure des paysages. Ces changements peuvent être à l'origine de l'isolement des zones d'habitat favorable aux espèces et contribuer à leur extinction (Noss et al., 1996 ; Woodroffe et Ginsberg, 1998). C'est le cas plus particulièrement de la fragmentation et la destruction des habitats naturels qui contribuent à l'augmentation de la mortalité des individus (Fahrig et al., 1995), à la diminution de leur succès de dispersion (Gibbs, 1998) induisant ainsi une hausse du taux de consanguinité et une perte de diversité génétique (Reh et Seitz, 1990 ; Wilson et Provan, 2003). Dans certains cas, si la dispersion est empêchée par le fait qu'il n'existe plus de continuité d'habitat favorable, ce sont des populations voire des espèces qui sont susceptibles de décliner puis de disparaître (Brown et Kodric-Brown, 1977 ; Harrison, 1992). Ainsi, la possibilité que des individus puissent traverser des paysages perturbés par l'homme est essentielle pour le maintien à long terme des populations (Fahrig, 2003 ; Cushman, 2006). Aujourd'hui, un des principaux enjeux des gestionnaires de la biodiversité est de permettre les déplacements des individus entre les zones d'habitat favorable (souvent appelés patchs), de façon à éviter l'isolement des populations et atténuer ainsi les impacts de la fragmentation ou de la destruction de l'habitat (Crooks et Sanjayan, 2006). Dans un premier temps, il apparaît important d'évaluer la connectivité entre les patchs d'habitat favorable, c'est-à-dire le degré avec lequel le paysage facilite ou entrave les mouvements des organismes (Taylor et al., 1993 ; Tischendorf et Fahrig, 2000). Puis, les gestionnaires chercheront à préserver ou à améliorer cette connectivité par la création, la restauration ou la conservation de passages, appelés corridors, existant

entre les patchs d'habitat favorable (Crooks et Sanjayan, 2006). Ces corridors sont des éléments linéaires qui favorisent le déplacement des individus au sein de leurs domaines vitaux ou leur dispersion vers de nouveaux territoires (Beier et al., 2008). La quantification de la connectivité entre les patchs d'habitat favorable pour une espèce est donc une étape importante et essentielle pour la définition et la mise en place de mesures de gestion des corridors (Moilanen et Hanski, 2001 ; Moilanen et Nieminen, 2002).

Trois catégories de méthodes existent actuellement pour mesurer la connectivité du paysage, correspondant à différentes déclinaisons de la connectivité (Calabrese et Fagan, 2004). La connectivité structurelle fait référence à la contiguïté de l'habitat, elle se focalise uniquement sur l'agencement spatial du paysage. Elle peut être mesurée par des indicateurs tels que la taille des patchs ou leur nombre. L'estimation de la connectivité structurelle a l'avantage de nécessiter des données faciles à collecter, mais a néanmoins un intérêt très limité puisqu'elle ne tient pas compte des caractéristiques de l'espèce (Moilanen et Nieminen, 2002). La connectivité potentielle combine les caractéristiques du paysage avec des données sur la dispersion de l'espèce (Urban et Keitt, 2001). Son évaluation tient compte de l'espèce considérée, de sa manière d'utiliser son habitat et du reste des éléments paysagers, qu'il s'agisse de leur composition ou de leur configuration spatiale (Taylore et al., 1993). Elle repose dans l'estimation des potentialités de déplacement des individus au sein de la zone étudiée, non pas à partir de données d'observations collectées sur cette zone, mais à partir d'estimations fondées notamment sur des caractéristiques écologiques de l'espèce et sur les caractéristiques physiques du paysage (Rathore et al., 2012). Enfin, la dernière déclinaison est la connectivité fonctionnelle, qui consiste à estimer des déplacements réels des individus au sein du paysage. Son estimation repose donc sur des données de déplacement d'individus entre les patchs d'habitat favorable, voire d'individus en dispersion. Plus informative, elle est néanmoins plus coûteuse (matériel, moyens humains) et plus difficile à étudier (nécessité de capturer des animaux pour des suivis par radio-télémétrie, GPS, etc. ; Hilty et Merenlender, 2004 ; Fagan et Calabrese, 2006 ; Graves et al., 2007). Elle est généralement utilisée à petite échelle (Calabrese et Fagan, 2004).

Dans un contexte opérationnel (de gestion), l'analyse de la connectivité potentielle semble la meilleure approche pour évaluer la connectivité. Elle présente en effet un bon compromis entre facilité d'obtention des données et prise en compte des caractéristiques des espèces. De plus, les méthodes d'analyse existantes sont applicables à de larges échelles spatiales. Actuellement, on distingue différents modèles permettant d'étudier la connectivité potentielle : les modèles basés sur des estimations de moindres coûts, les modèles modélisant les flux de dispersion et les modèles individu-centré spatialement explicites. Pour les modèles basés sur des estimations de moindres coûts, l'analyse du chemin de moindre coût 'Least-Cost Path' (LCP ; Walker et Craighead, 1997 ; Singleton et al., 2002 ; Larue et Nielsen, 2008) est la méthode la plus couramment utilisée par les gestionnaires et les chercheurs car simple d'utilisation. Elle représente une approche intermédiaire pour l'identification des corridors en termes d'exigences de données et de complexité du modèle (Adriaensen et al., 2003). La LCP évalue les trajectoires potentielles des individus à travers le paysage en se basant sur leur « coût » de déplacement entre les patchs d'habitat favorable (Beier et al., 2009). Ce coût peut représenter la difficulté de déplacement, l'évitement de certains types d'éléments paysagers ou encore le risque de prédatation (Beier et al., 2008). Ces coûts sont estimés à partir d'une carte de résistance où chaque maille a une valeur de coût dépendante de l'occupation du sol se trouvant dans cette maille. Parmi les différentes trajectoires possibles, le chemin de moindre coût est celui dont la somme des coûts des mailles traversées est la plus faible. Il représente donc le trajet optimal qu'un individu est susceptible de prendre (Walker et Craighead, 1997). L'approche LCP est critiquée par de nombreux auteurs dans la mesure où elle ne prend en compte que les corridors optimaux et ne donne aucune information sur les corridors alternatifs (Chetkiewicz et Boyce, 2009 ; Cushman et al., 2013). De plus, elle suppose que les individus aient une connaissance parfaite du paysage, leur permettant de suivre le chemin optimal (Cushman et al., 2013 ; Coulon et al., 2015). La théorie des circuits électriques est un second modèle qui se base également sur des cartes de résistance aux mouvements des espèces. Proposée par McRae (2006), cette approche est une alternative complétant la LCP puisqu'elle permet de trouver une multitude de corridors modélisés sous forme de flux (flux de dispersion). Le modèle se base sur l'analogie entre le mouvement des individus à travers un paysage et le courant électrique se déplaçant au sein d'éléments de résistance plus ou moins importants (McRae et al., 2008). Il met en évidence les goulots d'étranglement dans les secteurs (patchs ou corridors) à enjeux pour la dispersion, où se concentrent les plus forts courants. Il présente également l'avantage de prendre en compte la marche aléatoire des

individus (McRae et al., 2008). En revanche, il n'incorpore pas de réponses comportementales variant dans l'espace et dans le temps (Coulon et al., 2015). Pour terminer, la méthode basée sur des modèles individu-centré spatialement explicites (IBM : ‘individual-based model’) prend en considération et simule le comportement supposé des individus lorsqu’ils se déplacent dans le paysage (Zollner et Lima, 1999 ; Barton et al., 2012). La connectivité quantifiée par ce modèle est donc le résultat du comportement (les déplacements, la dispersion) des individus en réponse à l’hétérogénéité du paysage, associée à sa composition et sa structure spatiale (Revilla et al., 2004). Cette méthode, bien que très informative (Palmer et al., 2011), présente l’inconvénient d’exiger généralement un grand nombre de paramètres, nécessitant une très bonne connaissance de la biologie de l’espèce (Coulon et al., 2015). A ce jour, il existe peu d’études s’étant focalisées sur la comparaison d’approches méthodologiques différentes (e.g. Coulon et al., 2015 ; Bond et al., 2017).

Parmi les espèces sensibles à la fragmentation de l’habitat, les grands carnivores sont particulièrement concernés (Weaver et al., 1996 ; Crooks 2002). En effet, ces espèces occupent de grands territoires au sein desquels elles se déplacent beaucoup (Hetherington et al., 2006). De plus, certaines espèces de grands carnivores sont aujourd’hui présentes dans des paysages à prédominance humaine, ce qui les amène à se répartir sous forme de petites populations fragmentées et isolées sur l’ensemble de leur aire de répartition. C’est le cas du Lynx boréal (*Lynx lynx*) dont la majorité des populations présentes en Europe sont fragmentées en raison d’un manque de connectivité au sein de paysages anthropisés (Schadt et al., 2002 ; Kramer-Schadt et al., 2004 ; Marboutin et al., 2011). Cette fragmentation rend difficile la colonisation naturelle de territoires jadis occupés par l’espèce (Kramer-Schadt et al., 2004 ; Zimmermann et al., 2005). La fragmentation du milieu forestier est d’ailleurs reconnue comme une menace majeure pesant sur l’espèce de par ses besoins de grands espaces forestiers continus et ses capacités de dispersion relativement limitées (Zimmermann et al., 2007 ; Magg et al., 2016). Les collisions avec les véhicules représentent également une importante cause de mortalité chez l’espèce (Hemery et al., 2011) et donc un frein à sa dispersion. Différents travaux ont été conduits pour évaluer la connectivité potentielle pour le lynx en Europe afin de localiser, puis décrire, les corridors identifiés (en Allemagne par Schadt et al., 2002, en Suisse par Zimmermann et Breitenmoser, 2007, en France par Assmann, 2011 et Blanc, 2015). La plupart de ces travaux ont utilisé la méthode LCP entre les patchs d’habitat favorable. Cependant, aucun d’entre eux n’a jusqu’à présent exploré des méthodes de modélisation plus robustes que l’approche LCP pour explorer la connectivité potentielle pour le lynx en France. C’est dans ce cadre que s’inscrit la présente étude, qui vise à étudier la connectivité potentielle pour le lynx en France en appliquant et comparant (similitudes et divergences) trois méthodes de modélisation : l’approche du chemin de moindre coût (LCP), l’analyse fondée sur la théorie des circuits (CircuitScape) et le modèle individu-centré spatialement explicite (IBM ; **Figure 17**).

Ce travail s’intègre dans une problématique majeure qu’est la conservation de l’espèce. En effet, le lynx est inscrit sur plusieurs listes internationales et européennes justifiant la nécessité d’une protection ou la mise en place de mesures de conservation sur l’ensemble de son aire de répartition. En France, il est réparti en trois noyaux localisés au niveau des massifs des Vosges, du Jura et des Alpes (L’équipe animatrice du Réseau, 2016). La situation au sein de ces trois massifs est contrastée. Le Massif du Jura accueille le cœur de l’aire de présence de l’espèce (un peu plus d’une centaine de lynx ; L’équipe animatrice du Réseau, 2016) tandis que dans le Massif des Vosges, le lynx est dans un état de conservation critique (CROC, 2017) et dans les Alpes, le noyau de population est en cours d’installation (L’équipe animatrice du Réseau, 2016). Le Massif des Vosges occupe quant à lui une position stratégique à l’échelle de l’Europe occidentale en assurant la connexion entre les populations de lynx suisses, françaises et allemandes (Marboutin, 2013 ; Schwoerer et Scheid, 2016). Cependant, la question se pose actuellement d’un manque de connectivité avec le Massif du Jura empêchant les échanges de lynx entre les populations (Zimmermann et Breitenmoser, 2007 ; Assman, 2011 ; Blanc, 2015 ; Morand, 2016).

Ainsi, toutes analyses confondues, on s’attend à observer un manque de connectivité potentielle entre le Massif des Vosges et le Massif du Jura, et l’inverse entre le Massif du Jura et les Alpes. La théorie des circuits ainsi que le modèle IBM devraient nous apporter des informations complémentaires et supplémentaires à la LCP en modélisant les corridors alternatifs entre ces deux massifs. A l’issue des analyses, des pistes de mesures de gestion conservatoire sont proposées afin de guider l’interprétation de

la connectivité potentielle pour le lynx en France et contribuer à l'amélioration de l'état de conservation de la population.

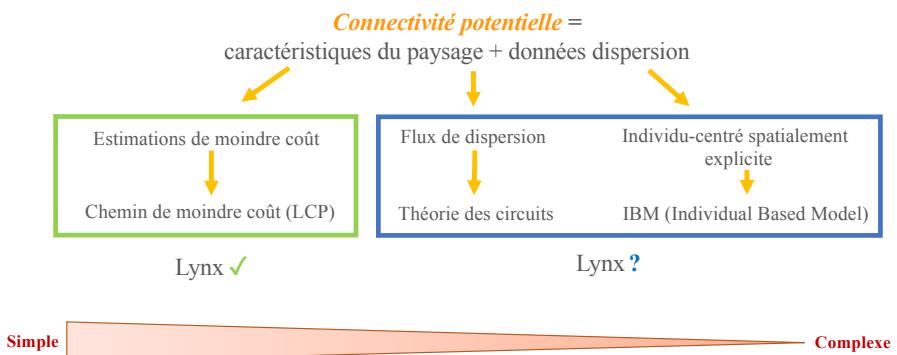


Figure 17 : Méthodes d'étude de la connectivité potentielle pour le Lynx boréal. En vert, les méthodes déjà explorées pour le lynx dans d'autres pays et reprises dans le cadre du stage pour le lynx en France. En bleu, les méthodes jamais explorées pour le lynx dans la littérature scientifique et explorées pendant le stage.

Les trois méthodes de modélisation des corridors conduisent à des cartes de connectivités potentielles différentes entre les massifs des Vosges, du Jura et des Alpes (**Figure 18**). Avec la méthode LCP, des corridors précis et bien délimités sont obtenus (lignes rouges). En revanche, avec la méthode de la théorie des circuits et le modèle IBM, l'information est plus diffuse puisqu'il n'y a pas de corridor net qui se dessine. La méthode de la théorie des circuits fait quant à elle ressortir davantage de zones à forte connectivité que la méthode IBM. De plus, les résultats obtenus montreraient l'existence d'une connectivité potentielle entre le sud du Massif de Jura et le nord du Massif des Alpes. En revanche, la connectivité entre le Massif du Jura et le Massif des Vosges ne conduit pas à un consensus.

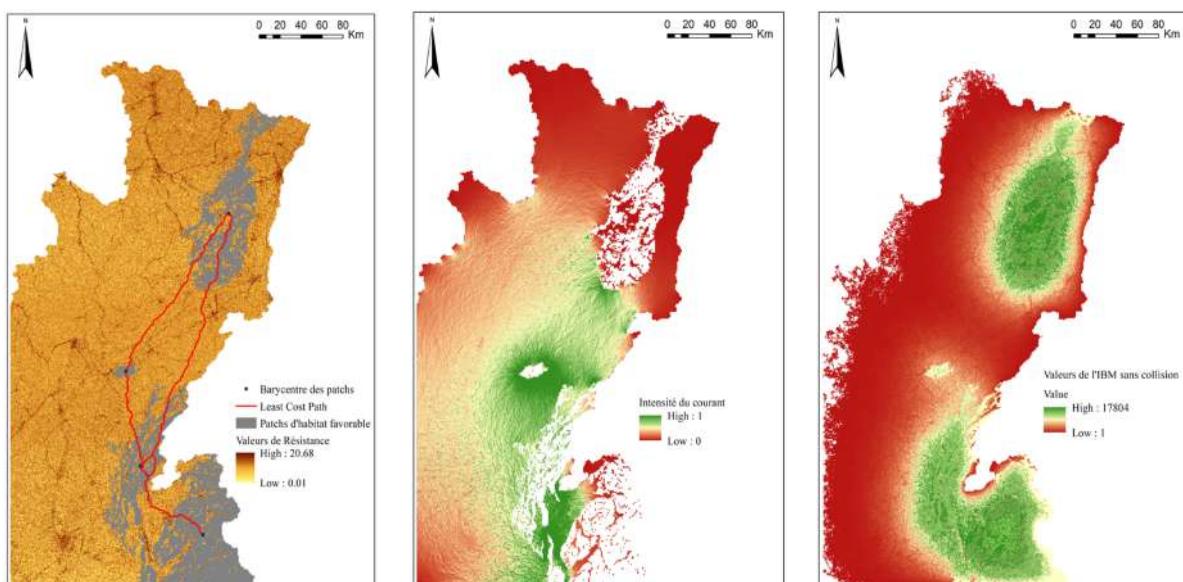


Figure 18 : A gauche : Carte de la connectivité potentielle pour le lynx en France obtenues avec la méthode du chemin de moindre coût (LCP) et l'approche des barycentres (les points de départ et d'arrivée sont les barycentres de chacun des patchs d'habitat favorable). Au milieu : Cartes de la connectivité potentielle pour le lynx en France obtenues avec la méthode de la théorie des circuits (les fortes valeurs de courant en vert représentent une forte probabilité que les lynx empruntent les corridors identifiés). A droite : Cartes de la connectivité potentielle pour le lynx en France obtenues avec le modèle IBM sans les probabilités de mortalité par collisions (plus la couleur s'approche du vert et plus le nombre de passages de lynx est important).

Au vu de ces résultats contrastés, il apparaît important d'utiliser différentes méthodes pour modéliser la connectivité potentielle. Ces résultats prometteurs nécessitent des investigations supplémentaires afin de stabiliser le diagnostic de connectivité pour le lynx en France et aboutir à des mesures concrètes de conservation. Néanmoins, quelques réflexions peuvent d'ores et déjà être conduites sur la nature des mesures de gestion à envisager à l'avenir pour améliorer les échanges d'individus entre noyaux de population Vosges-Jura-Alpes.

Tout d'abord, la présence de grandes surfaces forestières continues est indispensable pour le maintien de lynx sur un territoire et la dispersion des jeunes individus (Kramer-Schadt et al., 2004 ; Zimmermann et al., 2005). La fragmentation des forêts par de vastes surfaces agricoles et/ou artificialisées (altération de la perméabilité aux déplacements) ainsi que les infrastructures linéaires de transport (risque de mortalité par collision) constituent en effet un frein important à la dispersion (Klar et al., 2006 ; Kramer Schadt et al., 2004 ; Zimmermann et al., 2005). Le lynx en dispersion peut localement aussi être sensible aux configurations du paysage, telles que la présence de végétation le long des rivières (ripisylve), qui peuvent servir de corridor naturel (Zimmermann, 2004 ; Zimmermann et al., 2007). Ainsi, les gestionnaires devraient se concentrer sur la préservation ou la restauration des continuités forestières grâce à la mise en place de mesures de gestion conservatoire des habitats de dispersion du lynx (qui mériteraient néanmoins d'être précisées en France). La prise en compte du lynx dans les Schémas Régionaux de Cohérence Écologique (SRCE) de Lorraine, d'Alsace, Franche-Comté et de Rhône-Alpes (politiques publiques d'aménagement du territoire) ainsi que des enjeux de rétablissement des connectivités devraient contribuer à lutter contre la fragmentation des forêts (Morand 2016).

De plus, une réflexion devrait être conduite quant à l'intégration de nouveaux corridors ou flux de dispersion dans les SRCE/SRADDET en fonction de l'avancement des recherches sur la connectivité pour le Lynx. En complément, des actions devraient être conduites pour réduire la mortalité par collision comme la mise en place d'ouvrages de franchissement (passages à faune) en particulier sur les trois axes les plus dangereux identifiés pour les lynx sur la zone d'étude (Massif du Jura) : la N57 (25), la N5 (39) et la D470 (39 ; Gaillard et al., 2012 ; Annexe 4). L'amélioration de la signalétique sur ces zones à enjeux pourrait aussi être envisagée (Morand 2006).

Souillot D. 2019 / Stage de Master 2 / Université de Perpignan Via Domitia / Master Biodiversité, Ecologie, Evolution / Parcours "Biodiversité et Développement Durable". Sujet : Réduire et éviter le risque de mortalité du Lynx boréal (*Lynx lynx*) par collision avec les véhicules de transports terrestres dans le Massif du Jura ~ Typologie des tronçons accidentogènes et profils biologiques des lynx morts ». Encadrée par Alain Morand (Cerema Est) avec l'appui de l'équipe projet.

Souillot D. 2019. Réduire et éviter le risque de mortalité du Lynx boréal (*Lynx lynx*) par collision avec les véhicules de transports terrestres dans le Massif du Jura. Typologie des tronçons accidentogènes et profils biologiques des lynx morts. Rapport de stage de Master 2. Université de Perpignan Via Domitia, Master Biodiversité, Écologie, Évolution Parcours « Biodiversité et Développement Durable ». Le 20 juin 2019, Perpignan (66). *Communication orale*

Le rapport complet est disponible en **ANNEXE 4**.

Extraits du rapport de stage de Delphine Souillot.

En 2013, le réseau d'infrastructure de transport terrestre est de 64 millions de kilomètres de routes (CIA, 2013) dont 5 millions, en 2011, uniquement dans l'Union Européenne (EFR, 2011). Toutes ces routes ont l'objectif de constituer un réseau de communication et déplacement de plus en plus fin et rapide entre les agglomérations et leur périphérie, sur de plus longues distances. Chaque année, ce réseau, de même que le nombre de véhicules croissent davantage, notamment dans les pays en voie de développement.

Différentes études fondées sur des modèles mathématiques prédisent que d'ici 2050, ce sont 1.7 à 2.8 milliards de véhicules qui seront en circulation soit deux fois plus qu'en 2009 (870 millions ; Wec 2011 ; Meyer et al, 2012). Avec la disparition des milieux naturels et une artificialisation accrue des paysages, la fragmentation des habitats naturels continue elle aussi d'augmenter entraînant l'isolement des populations en milieu naturel, notamment celles des grands carnivores et parfois même, leur extinction (Chapron et al, 2014 ; Grilo et al, 2015). On observe trois conséquences majeures par les routes et le trafic sur la faune sauvage : la fragmentation des populations en sous-populations plus petites ; la disparition et dégradation des habitats favorables ; et l'augmentation de la mortalité par collision (Grilo et al, 2015). Toutes trois ont un impact négatif sur de nombreuses espèces sauvages et notamment sur les grands carnivores (Stahl et Vandel, 1998 ; Crooks, 2002 ; Schmidt-Posthaus et al, 2002). Ces derniers ont en effet de grands territoires sur lesquels ils se déplacent et où le risque de collision avec les Infrastructures Linéaires de Transport (ILT) est élevé. Par exemple, au sud de l'Espagne, la mortalité du Lynx pardelle (*Lynx pardinus*) par collision était de 17% en 2012 (Ferreras et al, 2012).

En 2009, l'ensemble des données mortalités du Massif du Jura de 1974 à 2008 ont été réétudiées dans le cadre d'un premier projet ITTECOP. Il en ressort que sur 104 individus morts, 58% des cas proviennent de collisions avec une infrastructure de transport terrestre (ITT), soit plus de la moitié (Gaillard et al. 2012). Un modèle de risque de collision est produit (Arzhela et al., soumis). Dans ce contexte, en 2017, le projet ITTECOP ERC-Lynx est initié en vue de co-construire un outil de modélisation à l'attention d'opérateurs techniques afin de les aider à la prise de décision d'aménagement du territoire. Le logiciel prendrait en compte les données actualisées de collisions et les facteurs structurels externes, les zones à fort risque de collisions identifiées par un modèle de statistique prédictif, et la viabilité des populations de lynx, leur comportement (dispersion notamment) via un modèle spatialement explicite individu-centré (SEPVA) et une interface étudiée pour des utilisateurs non spécialisés (CEFE-CNRS, Cerema, CROC, ONCFS, 2017). D'après un premier stage ERC-Lynx mené par C-A Oliver (2018) au CROC, il existe un réel problème de continuité écologique pour cette espèce. Son rapport, basé sur la comparaison de méthodes de modèles de corridors possibles entre les massifs, conclut sur une discontinuité majeure entre les Vosges et le Jura. Ce second stage s'est donné un double objectif, d'une part l'acquisition de connaissances et de données supplémentaires sur les ITT pour l'outil ERC-Lynx en cours de construction (atelier n°3 prévus en septembre 2019) et d'autre part, l'identification de solutions possibles et d'autres perspectives de collaboration en vue d'éviter et réduire la mortalité de lynx par collision dans le Massif du Jura. Face à ces accidents, de nombreuses questions sont survenues :

Existe-t-il des hot spots de mortalité dans le Massif du Jura ? Si oui, quelles en sont les causes ? Quelles sont les caractéristiques des routes ou tronçons de route accidentogènes à l'origine d'un risque plus élevé de collision entre le Lynx boréal et les véhicules de transports routiers ? La viabilité des populations étant un des enjeux du programme ERC-Lynx, existe-t-il des causes biologiques liées au comportement de l'espèce, en période de reproduction ou l'installation dans un territoire. Y-a-t-il des différences de mortalité par collision entre mâle et femelle, entre les adultes et les juvéniles ? Et sous réserve que les lynx utilisent bien des corridors pour se déplacer, existe-t-il une influence du contexte paysager sur la mortalité par collision ?

Dans ce contexte à la fois d'enjeu élevé de conservation de cette espèce rare et protégée et d'acquisition de connaissances utiles, plusieurs hypothèses scientifiques ont été abordées dans ce rapport de stage :

- Hypothèse 1 : Le Massif du Jura contient plusieurs hot spots de tronçons accidentogènes, il doit donc exister une typologie de route à l'origine d'un risque plus élevé de collision entre le lynx et les véhicules de transports routiers.
- Hypothèse 2 : Il existe des causes biologiques liées au comportement de l'espèce qui influence cette mortalité routière.
- Hypothèse 3 : De même, il est supposé que l'environnement, paysage proche joue un rôle dans la mortalité par collision.

Les objectifs de ce stage étaient donc doubles, d'une part alimenter, par l'apport de nouvelles variables plus fines, le modèle et outil interactif développé par ERC-Lynx et d'autre part, étudier de manière approfondie des cas de collisions sur 2 ou 3 tronçons bien identifiés à dire d'experts. Il s'agissait également de dégager une typologie des routes les plus à risque pour le lynx en vue de proposer des principes

généraux d'amélioration de ces infrastructures dans les zones favorables au lynx tant actuelles qu'en voie de colonisation potentielle.

Pour le premier objectif, notre contribution n'a pas pu permettre d'alimenter plus finement le modèle ERC-Lynx à cause de données absentes, hétérogènes, des conventions à élaborer pour l'obtention de données, etc. (**Figure 19**). Cette contribution a été essentielle, elle a permis de le discuter, lors des rencontres pour le PRA Lynx Massif des Vosges (CROC/DREAL Grand Est), le PNA Lynx (DREAL Bourgogne-Franche-Comté) et le Plan National pour la Conservation du Lynx (PNCL, WWF/Sfepm). Elle a contribué à inscrire plusieurs actions dans cet objectif d'acquisition, d'échange de données et de flux d'information entre les partenaires.

ITT	Variables	ITTECOP 2012	Modèle ERC	Recherche info
	<u>Variables transports :</u>			
	Vitesse moyenne		X	CD, DIR
	Trafic (fréquence des véhicules, PL/VL, Changement d'heure, vacances scolaire)	X	X	CD, DIR
	Type de route (Nb de voies, largeur en m, ouvert ou tunnel)	X		CD, DIR, SIG
	Signalétique			CD, DIR, Terrain
	Densité des routes (km/km ²)			CD, DIR, SIG
	<u>Variables aménagements :</u>			
	Type de clôture (Présente, Grande faune, petite faune, spécifique Lynx)			CD, DIR, SIG, Terrain
	Végétation de bas-côté (rasé/gestion intensive, haute/fauche tardive, visibilité)			CD, Terrain
	Sinuosité		X	CD, DIR, SIG
Voies routières	Type de terre plein central			CD, SIG, Terrain
	Végétalisation du terre-plein			CD, SIG, Terrain
	<u>Variables éco-aménagements :</u>			
	Localisation de passage à faune			CD, DIR, FDC, Asso, SIG
	Type de passage			CD, DIR, FDC, Asso, SIG, Terrain
	Efficacité du passage			CD, DIR, FDC, Asso
	<u>Autres variables :</u>			
	Collisions autres animaux			FDC, Asso
	Salage			CD, DIR

Figure 19 : Liste des variables « Transport » utilisées (en rappel Gaillard et al. (2012), celles utilisées dans le modèle ERC Lynx en 2018, recherchées dans le cadre de ce stage auprès des collectivités et d'associations).

Pour le second objectif, il reste encore à approfondir, même s'il résulte quelques tendances communes (**Figure 20**). Les collisions semblent survenir sur des routes départementales bidirectionnelles fortement agricoles en présence régulière de lynx. Sur de telles infrastructures, parmi les plus nombreuses dans le Massif du Jura, la vitesse est limitée à 80/90 km/h et elles sont davantage rectilignes que sinuueuse. Cependant ces rapports doivent être ramenés à la disponibilité de ces variables sur l'ensemble de la zone d'étude. Les nationales quant à elles, semblent être entourées le plus souvent de forêts. Comme dans la littérature, il est retrouvé ici également une influence des saisons, dont l'automne est la plus meurtrière pour les jeunes. La mortalité routière des lynx est donc influencée par la nature de la route, l'environnement proche, le comportement et la biologie de l'espèce, ainsi que sa présence.

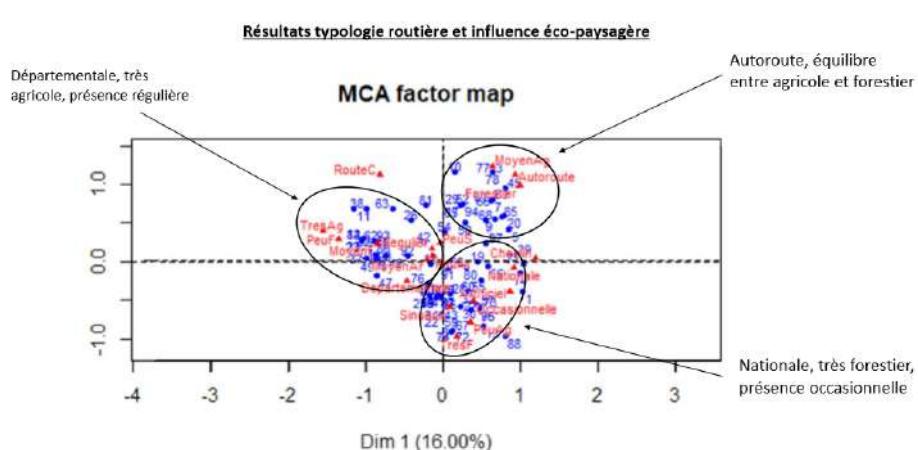


Figure 20 : Carte factorielle d'une analyse des correspondances multiples (ACM) entre X données de collision et Y variables Modalités « transport ».

A l'échelle des tronçons à forte collision comme à plus large échelle du Massif du Jura, certaines données mériteraient d'être renseignées et collectées sur le terrain ou via des logiciels simples (géoportal, pour exemple) mais très chronophages utilisés dans cette étude. Le travail effectué a permis de mettre en avant ces difficultés au niveau des données étudiées et échanger durant les réunions du PNA, PNCL et PLMV. Pour permettre de continuer de telles études, les différents groupes de travail ont décidé d'inscrire dans leur action l'acquisition des données liées aux ITT au travers d'une base de données à élaborer. De plus, par les échanges avec les différents acteurs, ce stage a renforcé et/ou créé des liens de collaboration avec les services routiers et environnement des départements, les FDC et plusieurs espaces naturels (PNR, RNN, ...). Enfin, de manière plus opérationnelle et à court terme, une fiche descriptive et de préconisation d'actions concrètes a été initiée afin de rendre compte des perspectives de travail sur des exemples de tronçon à risque dans le Doubs et le Jura ainsi que des mesures correctrices à proposer en vue de réduire la mortalité de lynx par collisions. Une réunion de restitution de ce travail a été faite avec le Conseil Départemental (CD) du Jura, elle demeure toujours avec les départements du Doubs et d'Ain afin d'approfondir la collaboration qui n'a pu être mise en place auparavant de manière fine.

Travail rapproché avec le Conseil Départemental du Jura (39)

Accueillie par le service « environnement et route » du CD 39, plusieurs jours consécutifs, Delphine Souillot a démontré malgré l'appui de leur équipe, la grande difficulté à l'acquisition de données « transport » homogènes et exploitables à l'échelle d'un département, pour être utilisées dans l'outil ERC-Lynx. Au-delà d'avoir revisité les données de mortalité et les points noirs de collision, elle a initié plusieurs réunions avec les acteurs concernés de ces secteurs. Plusieurs rencontres sur le terrain ont eu lieu également dans les deux départements majeurs du Massif du Jura. L'objectif était d'apprécier et d'échanger autour de certains points noirs et de certaines zones de franchissements privilégiés par le lynx, notamment des écopassages. Ces sorties ont été effectuées en présence de différents partenaires aux ateliers. Citons pour exemple la visite du 16 juin 2019 sur la commune d'Orchamps-Vennes dans le département du Doubs en présence de l'ONCFS, la FDC 25 et le CD 25. Une rencontre a également eu lieu le mercredi 22 juillet 2019 (**Figure 21**) en présence d'APRR avec l'équipe locale de l'ONCFS ainsi que l'animatrice du réseau Loup-Lynx de la région AuRA sur le tronçon à risque de l'autoroute A40 et A404 (Nantua, Ain).



Figure 21 : Le 22 juillet 2019, Delphine Souillot, au premier plan à gauche, en présence des agents de l'ONCFS (devenue OFB en 2020) et d'un agent d'APRR discutant de mesures d'amélioration des clôtures. Ce tronçon est particulièrement à risque pour les lynx (crédit photo Cerema Est)

Peu après son stage, Delphine a été recrutée au Cerema de septembre à fin novembre 2019 ; une partie de sa mission a consisté à finaliser une note préalable contribuant aux objectifs et actions à mener dans le cadre du PNA Lynx sur la problématique croisée des collisions lynx et des ITT de même qu'elle a poursuivi, lors d'une réunion, auprès du CD 39 l'identification des besoins et attentes en matière de mesures correctrices.

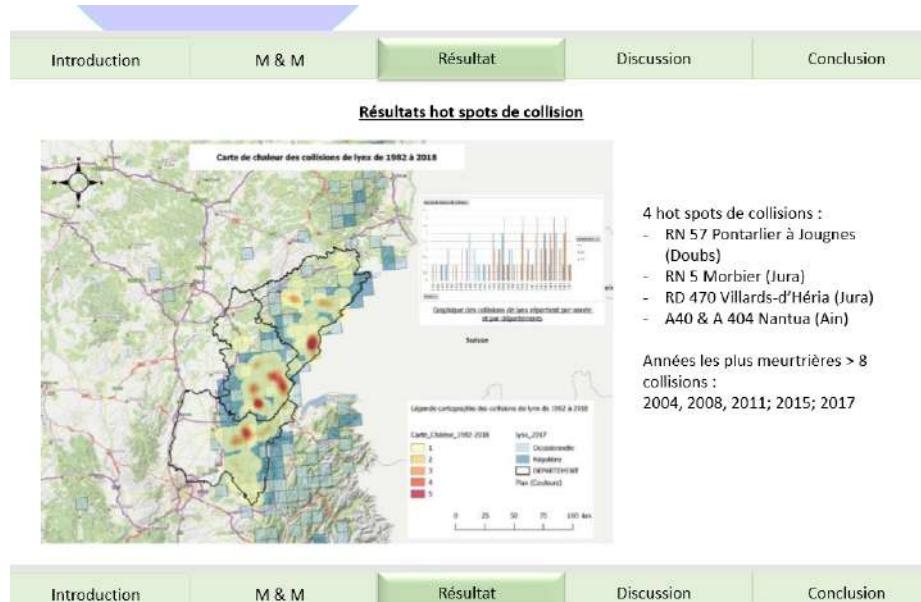


Figure 22 : Extrait d'une diapositive de la soutenance orale de Delphine Souillot « Carte de chaleur des principaux points chauds de collision dans le massif du Jura ».

En conclusion, le travail partenarial mené lors de ce stage porte ses fruits encore aujourd’hui. En effet, le Cerema identifié sur cette problématique est sollicité par la DREAL BFC (service route) et la DIR pour répondre à un aménagement au sud de la commune de Pontarlier intégrant une zone à risque pour le lynx. Au-delà de l’expertise de terrain (visite le 12 décembre 2020), une réflexion sera envisagée par un groupe de travail tout le long de la route nationale 57 au sud de la commune avec le souhait de tester l’outil ERC-Lynx dans la réflexion d’aménagement d’éco-passage notamment.

Partie 4. Retours réflexifs sur le projet

3.1. Atteinte de l'objectif initial

Actuellement, la perte d'habitat, le développement des infrastructures, la mortalité accidentelle par collision et les destructions illégales sont autant de menaces qui pèsent sur les populations de lynx en Europe. Des mesures de gestion inadaptées (parfois inexistantes), ainsi qu'une capacité de dispersion limitée, viennent accroître l'effet de ces menaces sur les populations. En France, 62% des lynx retrouvés morts sont concernés par des collisions routières, ce qui souligne l'importance de développer de nouveaux outils favorisant la prise en compte de cette espèce dans les projets d'aménagement. Les plans d'actions déclinés au niveau national (PNA Lynx) et régional (PRA Lynx Massif des Vosges) visent la restauration de l'espèce dans un état de conservation favorable, notamment par la réduction du risque de collision et le maintien, voire la restauration des continuités écologiques qui lui sont favorables. L'outil ERC-Lynx doit contribuer à cela, notamment dans le cadre de l'application de la séquence ERC.

Les projets d'aménagement (qu'ils soient routiers ou bâties), sont autant de projets susceptibles d'impacter la viabilité à plus ou moins long terme des populations transfrontalières de lynx présentes en France (Palatinat-Vosges/Jura/Alpes). **Aujourd'hui, les services en charge de réaliser l'évaluation environnementale et d'appliquer la séquence ERC pour un projet d'aménagement dans une zone de présence du lynx, s'appuient uniquement sur une analyse à dire d'expert à l'échelle locale et/ou nationale. Très bientôt, l'outil ERC-Lynx pourra être utilisé de manière complémentaire en mesurant les conséquences de tels impacts sur les populations à l'horizon de 50 ans.** Il permet aussi de comparer les effets positifs des mesures d'évitement (p.ex. recherche d'un nouveau tracé), de réduction (p.ex. création d'un éco pont), ou de compensation (p.ex. la plantation d'essences forestières sur un corridor existant pour faciliter la circulation de l'espèce).

3.2. Déroulé du projet

Le projet s'est déroulé de manière très satisfaisante. Nous insisterons sur trois points en particulier.

D'abord, une véritable dynamique positive s'est mise en place au sein de l'équipe projet entre ses membres aux compétences très complémentaires parmi lesquelles on peut citer la capacité de mise en réseau des acteurs (CEREMA, CROC, OFB), l'expertise sur les infrastructures routières (CEREMA), l'organisation et la facilitation d'ateliers participatifs multi-acteurs (CROC), les connaissances sur le lynx (CROC, OFB, CEFE) et la modélisation statistique et informatique (CEFE, OFB). Cette dynamique conférait une certaine neutralité pour le projet sur une espèce à la fois emblématique et à enjeu fort. Cette organisation a certainement contribué à rassurer les acteurs qui ont participé aux ateliers, à favoriser la bonne entente et à éviter les éventuels conflits.

Ensuite, le principal objectif était de produire un outil opérationnel d'aide à la prise de décision, et c'est chose faite avec l'interface facile d'utilisation développée pour l'outil (pas besoin de connaissance en statistique ou en informatique). Toutefois, à l'heure actuelle, les tests réalisés mettent en évidence la nécessité d'un travail complémentaire (au niveau du modèle et/ou des données qui l'alimentent et/ou de l'échelle) avant que l'outil ne puisse être diffusé largement auprès des gestionnaires.

Enfin, en ces temps difficiles pour la recherche scientifique française et ses jeunes chercheuses et chercheurs, l'équipe projet se félicite du recrutement de Sarah Bauduin, post-doctorante lors du démarrage du projet, sur un poste permanent à l'OFB au cours de celui-ci. Depuis le 19 septembre 2019, Charlotte-ERC-Lynx / Rapport final Septembre 2021

Anaïs Olivier prépare une thèse à Strasbourg, dans le cadre de l'École doctorale Sciences de la vie et de la santé, sous la direction de Carsten Schradin. Enfin, depuis le 2 mars 2020 et jusqu'au 5 mars 2021, Delphine Souillot occupe un poste de chargée de mission « Espace Naturel Sensible » dans le Service Environnement du Conseil Départemental de Haute-Savoie en assurant, notamment le suivi de Contrat de Territoire (outils de programme d'actions sur un territoire géré par une collectivité généralement des Communautés de communes). A titre bénévole LPO, elle a souhaité pouvoir participer au groupe de travail du Massif des Alpes dans le cadre du PNA Lynx, et est devenue l'une des personnes référentes cette année 2021.

3.3. Co-construction du modèle et de l'outil

La co-construction de modèles avec des acteurs non-spécialistes au cours d'ateliers constituait une première pour les modélisateurs/trices de l'équipe-projet. L'expérience fut exigeante, avec des étapes de modélisation non prévues à l'origine et demandées par les acteurs, mais à raison. Cette co-construction, bien que gourmande en temps et en énergie, a permis à l'équipe projet d'améliorer de manière significative le modèle sous-jacent au fonctionnement de l'outil ainsi que l'interface conçue pour faciliter son usage par les acteurs. L'outil ainsi créé est mieux accueilli et compris par les acteurs ayant participé aux ateliers qui, pour quelques-uns, sont de futurs potentiels utilisateurs. Son utilisation à l'avenir ne pourra qu'en être facilitée. Cela n'aurait probablement pas été le cas si l'outil avait été développé sans leurs contributions. En lien avec notre démarche de co-construction, et même si ça n'était pas dans le projet initial, il nous a semblé important d'ajouter une phase d'évaluation de l'usage de l'outil. Cette étape a fait l'objet d'une collaboration avec Agnès Méchin, alors étudiante en thèse sur l'opérationnalité des outils de la séquence ERC, qui a participé au 3^{ème} atelier en restituant à la fin de la séance une synthèse de ses observations à tous les participants. Agnès prépare un article scientifique qui implique des partenaires du projet ERC-Lynx dans lequel elle propose une réflexion sur le processus de conception des outils à vocation opérationnelle par des groupes de chercheurs académiques. L'objectif de son analyse est d'identifier, grâce à l'ergonomie, comment des équipes de chercheurs en écologie et en modélisation ont intégré l'objectif d'opérationnalité dans le processus de conception.

3.4. Difficultés rencontrées et pistes de résolution

Les tests de scénarios d'aménagement concrets réalisés et analysés par l'équipe projet afin de cadrer les limites d'utilisation de cette première version de l'outil ERC-Lynx, ont mis en évidences trois principales difficultés. Nous abordons dans cette dernière partie, quelques pistes d'explication / de résolution à court, moyen et plus long terme qui ont été présentées lors de la journée de restitution, le 4 juin 2021.

Premièrement, lors des ateliers, nous avons clairement identifié une inquiétude des acteurs quant à **la pérennité de l'outil** avec, en particulier, la question de la mise à jour des informations qui nourrissent le modèle et le besoin de formation à l'utilisation de l'interface. L'équipe projet s'est engagée lors des ateliers à assurer une veille du bon fonctionnement de l'outil. Le recrutement (poste permanent) de Sarah Bauduin à l'OFB est un gage de pérennité pour l'outil puisqu'une des missions de son poste de Chargée de recherche au sein de l'équipe Loup-Lynx consiste justement à continuer de le faire vivre. Comme cela l'a également été précisé, l'outil ERC-Lynx figure dans les actions du futur PNA Lynx et figure d'ores et déjà dans les actions du PRA Lynx Massif des Vosges. **A ce titre, un travail d'intégration de l'usage de l'outil dans les politiques d'aménagement du territoire est prévu en lien avec les DREAL des régions concernées.**

Deuxièmement, l'obtention des résultats de viabilité de la population de lynx en fonction de scénarios d'aménagement repose sur des simulations informatiques associées à des temps de calcul longs, nécessitant un équipement dédié à l'outil. Cela pourrait s'avérer être décourageant pour les utilisateurs/trices de l'outil qui ne disposeraient pas d'un matériel performant et adapté au bon fonctionnement de l'outil. C'est pourquoi, en amont du webinaire de restitution qui a eu lieu en juin 2021,

nous avons décidé que **le déploiement de l'outil ERC-Lynx se ferait en ligne grâce à des serveurs de calculs performants distants** pour faire fonctionner le modèle sans avoir à monopoliser un ordinateur performant pour tester des projets d'aménagement. Une période d'attente de quelques jours sera requise pour que les utilisateurs/trices reçoivent les résultats de leurs travaux sur l'outil ERC-Lynx en ligne. Dès 2022, le partenaire OFB financera une année de support en ligne pour l'interface (approx. 15.000 euros).

Troisièmement, l'équipe projet a réalisé des tests concrets de scénarios d'aménagement avec l'outil ERC-Lynx (création de passages à faune, création d'une autoroute, création d'une ZAC dans des secteurs de présence régulière du lynx). Cette étape indispensable a permis de mieux cerner les **limites d'utilisation de la première version de l'outil ERC-Lynx** en amont du webinaire de restitution. L'équipe-projet a exploré les questions/pistes suivantes afin de cerner les limites de l'outil et d'identifier les solutions à mettre en œuvre pour que l'outil réponde au mieux aux attentes des gestionnaires et au besoin de conservation du lynx face à la menace de destruction de son habitat et au risque de collision :

- La sensibilité du modèle aux projets d'aménagement dans le temps et dans l'espace qu'ils soient à impact positif ou négatif sur le risque de collision ou affectant l'habitat favorable au lynx.
- La prise en compte de plusieurs projets d'aménagement par leur connaissance anticipée afin d'intégrer le caractère additionnel de leurs impacts.
- La résolution du modèle et sa déclinaison à des échelles plus fines (l'échelle des départements nous semble intéressante ainsi que l'échelle régionale) qui suppose d'obtenir de l'information fine tant sur le plan des variables transport (connaissance de tous les ouvrages de franchissement, du trafic journalier, ...) qu'au niveau de l'écologie des lynx (améliorer la finesse des hypothèses sur le déplacement, le comportement, ...).

L'outil en son état d'avancement est fonctionnel et donne des résultats fiables pour la plupart des scénarios possibles d'être créés. Seule la création de passages à faune ne semble pas impacter les populations simulées de lynx. La raison identifiée concerne le processus de dispersion, tel que simulé actuellement dans le modèle individu-centré, qui ne prend pas en compte le réseau routier comme barrière au mouvement. En effet, le réseau routier est actuellement inclus dans le modèle seulement comme une source de mortalité. Les individus simulés « ne voient » pas les routes, ils les traversent et meurent ou survivent en les traversant. L'ajout d'un passage à faune n'est donc pas détecté par les individus qui se déplacent « sans voir » ni les routes ni les passages à faune. Les passages à faune impactent finalement les populations de lynx seulement lorsque, par hasard, un individu l'emprunte, sa probabilité de mourir par collision devenant alors nul. Ceci n'est pas réaliste et c'est pourquoi nous souhaitons améliorer l'outil grâce à la prise en compte des infrastructures de transports dans le modèle individu-centré au niveau de la simulation de la dispersion, pour que les individus prennent en compte ces linéaires dans le choix du mouvement. L'impact des passages à faune sera alors visible puisque les individus auront plus de propension à choisir ces structures plutôt que de traverser les routes. L'impact sur les populations sera alors lui aussi plus visible que lorsqu'ils sont empruntés par hasard seulement. Ceci améliora aussi le réalisme de la simulation de dispersion et donc des simulations des populations de lynx en général. Cette amélioration de la simulation du processus de dispersion nécessitera des données pour recalibrer cette partie du modèle. Des données télémétriques de lynx à proximité de routes de différents types seront nécessaires pour pouvoir calibrer la probabilité des individus à les traverser ou les éviter. Un partenariat avec le KORA en Suisse est envisagé afin de bénéficier de leurs données télémétriques pour faire ce travail.

Concernant problématique des multiples projets d'aménagements afin de prendre en compte l'effet cumulé des projets, il reviendra à l'utilisateur de se renseigner auprès des services compétents pour prendre en compte ces différents projets dans son scénario d'aménagement. L'outil ERC-Lynx permet quant à lui de construire, via l'interface, plusieurs aménagements à différents endroits en même temps et ainsi, d'inclure l'effet cumulé de tous ces aménagements dans l'estimation de la viabilité des populations de lynx. Il en est de même pour les conséquences d'aménagements sur l'environnement (p.ex. l'augmentation du trafic routier après la mise en place d'une nouvelle zone urbaine). L'outil ne prédit pas

les conséquences d'aménagements sur d'autres éléments susceptibles d'impacter le lynx, c'est à l'utilisateur de les renseigner dans son scénario d'aménagement.

Quant à la question de la résolution, il n'est pas possible pour l'instant d'utiliser l'outil à une échelle plus fine pour des projets plus locaux. Le modèle Lynx-Collision-Habitat a été construit sur une grille de 1 km², cette contrainte était due aux données de présence de lynx ainsi qu'aux autres données environnementales. Sans données plus précise (p.ex. données issues de suivi GPS pour la présence de lynx), il n'est pas possible d'avoir un modèle à une résolution plus fine. Enfin, la mise à jour du modèle grâce à la mise à jour de données (p.ex. lynx, Corine Land Cover, réseau routier, etc.) est bien prévue à l'avenir et ce de manière régulière.

Partie 4. Liste des productions

Colloques nationaux ou internationaux (avec PPT, Poster)

Gimenez O., Marboutin E., Germain E. & Morand A. 2017. Éviter, réduire et compenser le risque de mortalité du Lynx par collision avec les véhicules de transport. Colloque de l'appel CILB-ITTECOP-FRB, les 19 et 20 octobre 2017, Paris. *Communication orale*

Bauduin S., Blanc L., Bernard C., Charbonnel A., Chrétien L., Duchamp C., Germain E., Hemery A., Kramer-Schadt S., Marboutin E., Morand A., Zimmermann F. & Gimenez O. 2018. A user-friendly computer platform to assess the impact of transport infrastructures on wildlife: A case study with the Eurasian lynx in France. IENE, 11th-14th September, Eindhoven, The Netherlands. *Communication orale*

Bauduin S., Blanc L., Bernard C., Charbonnel A., Chrétien L., Duchamp C., Germain E., Hemery A., Kramer-Schadt S., Marboutin E., Morand A., Zimmermann F. & Gimenez O. 2018. Guiding decision-making to mitigate lynx-vehicle collisions using spatially-explicit individual-based models. SFEcologie 2018, October 23rd, Rennes, France. *Communication orale*

Bauduin S., Charbonnel A., Chrétien L., Coulon A., Drouet-Hoguet N., Duchamp C., Germain E., Olivier C.-A., Morand A., Souillot D. & Gimenez O. 2019. ERC-Lynx « Éviter, réduire et compenser le risque de mortalité du Lynx par collision avec les véhicules de transport ». Colloque ITTECOP 2019, Fonctionnalités écologiques et territoriales des infrastructures linéaires de transport et de leurs emprises, 5-7 juin 2019, Ademe Sophia-Antipolis, Valbonne, France. *Communication orale*

Drouet-Hoguet N., Chenesseau D., Kunz F. & Zimmermann F. 2021. Situation of the Eurasian lynx in the Jura Mountains. June 16-19th 2019, Bonn, Germany. Organised by the Upper Rhine Conference and the IUCN Cat Specialist Group. *Communication orale*

Bauduin S., Charbonnel A., Chrétien L., Drouet-Hoguet N., Duchamp C., Germain E., Morand A. & Gimenez O. 2019. Co-construction d'une plateforme pour tester l'impact d'aménagements. Cas d'étude : le Lynx boréal en Europe centrale. Séminaire OïkoLab, 26-27 juin 2019, Sorèze, France. *Communication orale*

Bauduin S., Charbonnel A., Chrétien L., Drouet-Hoguet N., Duchamp C., Germain E., Morand A. & Gimenez O. 2019. Guiding decision-making to mitigate lynx-vehicle collisions using spatially-explicit individual-based models. JIEM-Nantes 2019. Les 22 et 23 octobre 2019, Nantes (44). *Communication orale*

Bauduin S., Charbonnel A., Chrétien L., Drouet-Hoguet N., Duchamp C., Germain E., Morand A. & Gimenez O. 2019. Projet ERC-Lynx - Un outil d'aide à la décision dans la gestion des collisions lynx-véhicules. Semaine technique de l'UPAD à l'ONFCS, novembre 2019, (-). *Communication orale*

Bauduin Sarah, Blanc Laetitia, Charbonnel Anaïs, Duchamp Christophe, Drouet-Hoguet Nolwenn, Germain Estelle, Heurich Marco, Kramer-Schadt Stephanie, Morand Alain, Zimmermann Fridolin, and Gimenez Olivier. 2020. Reducing lynx-vehicle collisions. From statistics and individual-based modeling to management decisions in a user-friendly interface. virtual International Statistical Ecology Conference, June 22-26, 2020. *Poster*

Groupes de travail / Ateliers / Workshops (avec PPT)

Bauduin S., Blanc L., Bernard C., Charbonnel A., Chrétien L., Duchamp C., Germain E., Hemery A., Kramer-Schadt S., Marboutin E., Morand A., Zimmermann F. & Gimenez O. 2018. Avoid, reduce and compensate for lynx mortality risk by collision with transport vehicles. Lynx workshop, October 15th, Hans Eisenmann Haus, Neuschönau, Bavarian Forest national park, Germany. *Communication orale*

Olivier C.-A., Coulon A., Charbonnel A., Gimenez O. et Germain E. 2018. Étude comparative de différentes méthodes de modélisation de corridors écologiques pour le Lynx boréal en France. Stage de Master 2 réalisé au CROC en collaboration avec le CNRS CEFE dans le cadre du projet ERC-Lynx « Éviter, réduire et compenser le risque de mortalité du Lynx par collision avec les véhicules de transport ». Réunion annuelle des correspondants du Réseau Loup Lynx pour les départements du Bas-Rhin et de la Moselle, 10 décembre 2018, Mairie de Bitche, Bitche (57). *Communication orale*

Olivier C.-A., Coulon A., Charbonnel A., Gimenez O. et Germain E. 2018. Étude comparative de différentes méthodes de modélisation de corridors écologiques pour le Lynx boréal en France. Stage de Master 2 réalisé au CROC en collaboration avec le CNRS CEFE dans le cadre du projet ERC-Lynx « Éviter, réduire et compenser le risque de mortalité du Lynx par collision avec les véhicules de transport ». Réunion annuelle des correspondants du Réseau Loup Lynx pour les départements des Vosges et du Haut-Rhin, 19 décembre 2018, Fédération Départementale des Chasseurs des Vosges, Épinal (88). *Communication orale*

Bauduin S., Charbonnel A., Chrétien L., Coulon A., Drouet-Hoguet N., Duchamp C., Germain E., Olivier C.-A., Morand A., Souillot D. & Gimenez O. 2019. ERC-Lynx : Éviter, réduire et compenser le risque de mortalité du Lynx par collision avec les véhicules de transport. Groupes de travail « Suivi du Lynx » et « Coexistence avec les activités humaines » du PNA en faveur du Lynx en France. Les 11 et 12 avril 2020, Besançon (25), France. *Communication orale*

Bauduin S., Charbonnel A., Chrétien L., Coulon A., Drouet-Hoguet N., Duchamp C., Germain E., Olivier C.-A., Morand A., Souillot D. & Gimenez O. 2019. ERC-Lynx : Éviter, réduire et compenser le risque de mortalité du Lynx par collision avec les véhicules de transport. Journée d'échanges « Continuités écologiques et collisions avec la faune : des données aux solutions ». Centre de ressources Trame verte et bleue en partenariat avec le Ministère de la transition écologique et solidaire, 2 juillet 2019, Grande Arche de la Défense, Paris (75). *Communication orale*

Bauduin S., Charbonnel A., Chrétien L., Coulon A., Drouet-Hoguet N., Duchamp C., Germain E., Olivier C.-A., Morand A., Souillot D. & Gimenez O. 2019. Co-construction d'un outil d'aide à la décision dans la gestion des collisions lynx-véhicules. Réunion de restitution du PRA en faveur du Lynx dans le Massif des Vosges. Le jeudi 21 novembre 2019, Saint-Dié-des-Vosges (88). *Communication orale*

Bauduin S., Charbonnel A., Chrétien L., Coulon A., Drouet-Hoguet N., Duchamp C., Germain E., Olivier C.-A., Morand A., Souillot D. & Gimenez O. 2019. Co-construction d'un outil d'aide à la décision dans la gestion des collisions lynx-véhicules. Réunion de SNCF Réseau / Développement Durable. Le 28 novembre 2019, Seine-Saint-Denis (93).

Articles scientifiques en cours en lien avec ERC-Lynx

Une publication sur le modèle individu-centré spatialement explicite est quasi-prête à être soumise à la revue *Biological Conservation* (voir ANNEXE 2). Ce travail met en valeur la capacité du modèle à quantifier la viabilité des populations de Lynx à l'échelle européenne. La rédaction a nécessité du temps car nous avons voulu en faire une collaboration internationale avec nos collègues allemands (Stephanie Kramer-Schadt, Marco Heurich, Sylvia Idelberger, Micha Herdtfelder) et suisses (Fridolin Zimmermann). D'autres publications seront rédigées sur le modèle de collision, le modèle d'habitat, l'interface et la démarche de co-construction avec les acteurs.

Réunions d'information / Formation / Débriefings (avec PPT)

Germain E. & Charbonnel A. 2017. Le CROC au sein du programme ERC-Lynx 2015-2018 « Éviter, réduire et compenser le risque de mortalité du Lynx par collision avec les véhicules de transport ». Réunion de travail de l'équipe projet, 24 novembre 2017, Cerema, Direction technique territoire et ville, Lyon (69). *Communication orale*

Olivier C.-A., Coulon A., Charbonnel A., Gimenez O. et Germain E. 2018. Étude comparative de différentes méthodes de modélisation de corridors écologiques pour le Lynx boréal en France. Stage de Master 2 réalisé au CROC en collaboration avec le CNRS CEFE dans le cadre du projet ERC-Lynx « Éviter, réduire et compenser le risque de mortalité du Lynx par collision avec les véhicules de transport ». Réunion annuelle des correspondants du Réseau Loup Lynx pour les départements du Bas-Rhin et de la Moselle, 10 décembre 2018, Mairie de Bitche, Bitche (57). *Communication orale*

Olivier C.-A., Coulon A., Charbonnel A., Gimenez O. et Germain E. 2018. Étude comparative de différentes méthodes de modélisation de corridors écologiques pour le Lynx boréal en France. Stage de Master 2 réalisé au CROC en collaboration avec le CNRS CEFE dans le cadre du projet ERC-Lynx « Éviter, réduire et compenser le risque de mortalité du Lynx par collision avec les véhicules de transport ». Réunion annuelle des correspondants du Réseau Loup Lynx pour les départements des Vosges et du Haut-Rhin, 19 décembre 2018, Fédération Départementale des Chasseurs des Vosges, Épinal (88). *Communication orale* (Anaïs pas là)

Vulgarisation

Sites internet :

<http://www.ittecop.fr/recherches-2017/projets-de-recherche/erc-lynx.html>
<https://sites.google.com/view/erclynx/>

Plaquette de communication sur le projet et l'outil ERC-Lynx : voir ANNEXE 5.

Webdocumentaire en cours avec ITTECOP.

Parution en 2018 d'un article sur le projet ERC-Lynx dans Qu'est ce qui se trame ? # 38, Avril 2018. Lettre d'information nationale sur la Trame verte et bleue. Zoom sur... « Un projet de recherche pour réduire la mortalité du lynx par collision. » (<http://www.trameverteetbleue.fr/vie-tvb/lettre-information/38#zoom>)

Parution en 2019 d'un article sur le projet ERC-Lynx « Un outil destiné aux territoires pour réduire l'accidentologie du Lynx » sur le site internet du Cerema <https://www.cerema.fr/fr/actualites/outil-destine-aux-territoires-reduire-accidentologie-du-lynx>.

Parution en 2020 d'un article sur le projet ERC-Lynx dans la 1^{ère} lettre d'actualités sur le Lynx boréal de la SFEPM paru en février 2020. Recherche : À venir : journée de restitution du projet « Éviter, Réduire et Compenser (ERC) la mortalité du Lynx par collision avec les véhicules de transport ». (<https://www.sfepm.org/les-actualites-de-la-sfepm/lynx-boreal-nouvelles-dici-et-dailleurs.html>)

Parution en 2020 d'un article montrant l'intérêt de l'écologie statistique pour la conservation du Lynx dans The Conversation : « Mieux connaître le Lynx boréal grâce à l'écologie statistique » (<https://theconversation.com/mieux-connaître-le-lynx-boreal-grâce-a-l-écologie-statistique-147241>)

Parution en 2021 d'un article sur la page web de l'OFB résumant le projet ERC-Lynx (<https://professionnels.ofb.fr/index.php/fr/node/1162>)

Parution en 2021 d'un article sur le projet ERC-Lynx dans la 5^{ème} lettre d'actualités sur le Lynx boréal de la SFEPM paru en février 2020. Recherche : À venir : webinaire de restitution du projet « Éviter, Réduire et

Compenser (ERC) la mortalité du Lynx par collision avec les véhicules de transport ».
[\(<https://www.sfepm.org/les-actualites-de-la-sfepm/lynx-boreal-nouvelles-dici-et-dailleurs.html>\)](https://www.sfepm.org/les-actualites-de-la-sfepm/lynx-boreal-nouvelles-dici-et-dailleurs.html)

Parution en 2021 d'un article sur le projet ERC-Lynx dans Le Courrier de la Nature, Numéro spécial 2021 p68), « Infrastructures et collisions / Éviter, réduire et compenser le risque de mortalité » par Alain Morand (<https://www.snpn.com/produit/le-courrier-de-la-nature-n-special-2021-le-lynx/>).

Stages

Olivier C.-A. 2018 / Stage de Master 2 / École Pratique des Hautes Études (EPHE) de Paris, Master Biodiversité et Gestion de l'Environnement – Axe Écologie continentale en voie Recherche. Sujet : Étude comparative de différentes méthodes de modélisation de corridors écologiques pour le Lynx boréal en France. Co-encadrée par A. Charbonnel (CROC), E. Germain (CROC), O. Gimenez (CEFE) et Aurélie Coulon (CEFE). **Voir ANNEXE 3**

Olivier C.-A. 2018. Étude comparative de différentes méthodes de modélisation de corridors écologiques pour le Lynx boréal en France. Soutenance de Master 2 réalisé au CROC en collaboration avec le CNRS CEFE, le 6 septembre 2018, École Pratique des Hautes Études, Paris (75), France. *Communication orale*

Souillot D. 2019 / Stage de Master 2 / Université de Perpignan Via Domitia / Master Biodiversité, Ecologie, Evolution / Parcours "Biodiversité et Développement Durable". Sujet : Réduire et éviter le risque de mortalité du Lynx boréal (*Lynx lynx*) par collision avec les véhicules de transports terrestres dans le Massif du Jura ~ Typologie des tronçons accidentogènes et profils biologiques des lynx morts ». Encadrée par Alain Morand (Cerema DTer Est). **Voir ANNEXE 4**

Souillot D. 2019. Réduire et éviter le risque de mortalité du Lynx boréal (*Lynx lynx*) par collision avec les véhicules de transports terrestres dans le Massif du Jura. Typologie des tronçons accidentogènes et profils biologiques des lynx morts. Rapport de stage de Master 2. Université de Perpignan Via Domitia, Master Biodiversité, Écologie, Évolution Parcours « Biodiversité et Développement Durable ». Le 20 juin 2019, Perpignan (66). *Communication orale*

Liens transversaux du projet ERC-Lynx avec d'autres projets sur le Lynx en France

Pendant la période du projet ERC-Lynx, le partenaire CROC était animateur du Programme Lynx Massif des Vosges (PLMV) devenu fin 2019 le Plan Régional d'Actions en faveur du Lynx boréal dans le Massif des Vosges. L'outil ERC-Lynx et son évolution souhaitée à l'avenir sont inclus dans la mise en œuvre des actions du PRA concernant l'enjeu « Habitat et connectivité écologique ». Par ailleurs, les partenaires OFB (ex-ONCFS) et Cerema sont acteurs du groupe de travail « Habitat et connectivité écologique » du PRA. A ce titre, le Cerema a participé à l'ensemble des réunions des groupes visant à construire les actions du plan (les 21 juin 2018 sur une demi-journée, 24 janvier 2019 sur une journée, 27 mai 2019 sur une demi-journée, 21 novembre 2019 sur une journée/voir Attendu 8). Les partenaires CEFE, Cerema, OFB et CROC sont co-pilotes d'actions « Habitat et connectivité écologique ».

Les partenaires CROC et Cerema ont participé le 10 octobre 2018 à Besançon au premier comité de pilotage du Plan national pour la conservation du Lynx en France coordonné par la SFEPM (mandaté par le WWF). A cette occasion, l'étude DGITM « Cerema », le projet ITTECOP ERC-Lynx ont été cités tout comme le PLMV/PRA Lynx Massif des Vosges.

Le partenaire CEFE fait partie du conseil scientifique du Plan National d'Actions en faveur du Lynx en France lancé début 2019. Le partenaire OFB (ex-ONCFS) a en charge la rédaction du PNA dont le portage est assuré par la DREAL Bourgogne Franche-Comté. Les partenaires CROC et Cerema sont acteurs des groupes de travail « Suivi du Lynx » et « Coexistence avec les activités humaines » du PNA (voir Attendu 8). Le partenaire Cerema, en tant que pilote, portera les actions liées aux risques de collision et les mesures correctrices qui lui sont associées dans le cadre du PNA. La poursuite et l'amélioration de l'outil ERC-Lynx s'inscrit dans cette thématique en tant qu'actions prioritaires de recherche et de mise en œuvre concrète sur le territoire à poursuivre.

Références bibliographiques⁴

- Assmann C. (2011) Etude de la connectivité des massifs des Vosges et du Jura au niveau de la trame forestière. Master FAGE. Biologie et Ecologie pour la Forêt, l'Agronomie et l'Environnement. Université de Nancy, 51p.
- Basille, M., Calenge, C., Marboutin, E., Andersen, R., & Gaillard, J.-M. (2008) Assessing habitat selection using multivariate statistics: Some refinements of the ecological-niche factor analysis. *Ecological Modelling* 211, 233-240.
- BfN (Bundesamtes für Naturschutz) (2017) <https://ffh-anhang4.bfn.de/arten-anhang-iv-ffh-richtlinie/saeugetiere-sonstige/luchs-lynx-lynx.html>.
- Blanc, L. (2015) Dynamique des populations d'espèces rares et élusives : Le Lynx Boréal en Europe. Thèse en Biologie des populations et Ecologie, Université de Montpellier 2, UMR CNRS 5175 (Laboratoire d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive), 268p.
- Breitenmoser, U. & Haller, H. (1987) La réintroduction du Lynx (*Lynx lynx* L. 1758) : une appréciation après 15 ans d'expérience en Suisse. *Ciconia*, 119–130.
- Breitenmoser, U., Breitenmoser-Würsten, C., Okarma, H., Kaphegyi, T., Kaphegyi-Wallmann, U., & Müller, U. M. (1998) A large carnivore initiative for Europe. The action plan for the conservation of the Eurasian Lynx (*Lynx lynx*) in Europe. *WWF international*, Suisse.
- Breitenmoser, U., Breitenmoser-Würsten, C., Okarma, H., Kaphegyi, T., Kaphygyi-Wallmann, U., & Müller, U. M. (2000) Action Plan for the conservation of the Eurasian Lynx (*Lynx lynx*) in Europe. *Nature and environment* 112, 68p.
- Breitenmoser-Würsten, C., Zimmermann, F., Ryser, A., Capt, S., Laass, J., Siegenthaler, A., & Breitenmoser, U. (2001) Untersuchungen zur Luchspopulation in den Nordwestalpen der Schweiz 1997–2000. *KORA Bericht*.
- Breitenmoser-Würsten, C., Vandel, J.-M., Zimmermann, F., & Breitenmoser, U. (2007a) Demography of lynx (*Lynx lynx*) in the Jura Mountains. *Wildlife Biology* 13, 381-392.
- Breitenmoser-Würsten, C., Zimmermann, F., Stahl, P., Vandel, J.-M., Molinari-Jobin, A., Molinari, P., Capt, S., & Breitenmoser, U. (2007b) Spatial and social stability of a Eurasian lynx *Lynx lynx* population: an assessment of 10 years of observation in the Jura Mountains. *Wildlife Biology*, 13. 365–380.
- Briaudet, P.-E., & Gatti, S. (2014) Bilan 2013-2014 du piégeage photographique dans les Alpes : quand on cherche, on trouve... *Bulletin Lynx du Réseau*, 19, 14-17.
- Chapron, G., Kaczensky, P., Linnell, J.D.C., et al. (2014) Recovery of large carnivores in Europe's modern human-dominated landscapes. *Science*, 346, 1517–1519.
- Gimenez, O., Gatti, S., Duchamp, C., Germain, E., Laurent, A., Zimmermann, F., & Marboutin E. (2019) Spatial density estimates of Eurasian lynx (*Lynx lynx*) in the French Jura and Vosges Mountains. *Ecology and Evolution* doi:10.1002/ece3.5668.
- Grilo, C., Smith, D.J., & Klar, N. (2015) Carnivores: Struggling for survival in roaded landscapes, 300-312. In: van der Ree, R., Smith, D.J., & Grilo, C. (Eds.), *Handbook of Road Ecology*. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK.
- Hemery, A., Doré, A., Basille, M., Bonenfant, C., Gaillard, J. M., Marboutin, E., & Mauz, I. (2013) Mise au point d'un modèle de diagnostic des interactions entre structures paysagères, infrastructures de transports terrestres et espèces emblématiques : le cas du lynx dans le massif jurassien. Poster présenté au colloque *Infrastructures de Transports Terrestres, ECOSystèmes et Paysages (ITTECOP)*, 26-27 septembre 2013, Valbonne.
- Henriksen, H.B., Andersen, R., Hewison, A.J.M., Gaillard, J.-M., Bronndal, M., Jonsson, S., Linnell, J.D.C., & Odden, J. (2005) Reproductive biology of captive female Eurasian lynx, *Lynx lynx*. *European Journal of*

⁴ Hors documents présentés en annexe de ce rapport ;

- Wildlife Research 51, 151–156.
- Jedrzejewski, W., Schmidt, K., Okarma, H., & Kowalczyk, R. (2002) Movement pattern and home range use by the Eurasian lynx in Białowieża Primeval Forest (Poland). *Annales Zoologici Fennici*, 39, 29–41.
- Kaczensky, P., Chapron, G., von Arx, M., Huber, D., Andrén, H., & Linnell, J. (eds) (2012) Status, management and distribution of large carnivores - bear, lynx, wolf & wolverine - in Europe. Part 1 and 2. Report to the EU Commission, 72p.
- Kaczensky, P. (2018) IUCN Red List Mapping for the regional assessment of the Eurasian Lynx (*Lynx lynx*) in Europe. Supplementary information. 13p.
- Kaczensky, P., Chapron, G., von Arx, M., Huber, D., Andrén, H., & Linnell, J. (2013) Status, management and distribution of large carnivores – bear, lynx, wolf and wolverine – in Europe. Part 1 and 2. Report to the EU Commission, 72p.
- Klar, N., Herrmann, M., & Kramer-Schadt, S. (2006) Effects of roads on a founder population of lynx in the biosphere reserve “Pfalzerwald -Vosges du Nord” - A model as planning tool. *Naturschutz und Landschaftsplanung*, 38, 330–337.
- KORA (2017) <https://www.kora.ch/index.php?id=84&L=2>
- Kramer Schadt, S., Revilla, E., Wiegand, T., & Breitenmoser, U. (2004) Fragmented landscapes, road mortality and patch connectivity: Modelling influences on the dispersal of Eurasian lynx. *Journal of Applied Ecology*, 41, 711–723.
- Kramer-Schadt, S., Revilla, E., & Wiegand, T. (2005) Lynx reintroductions in fragmented landscapes of Germany: Projects with a future or misunderstood wildlife conservation? *Biological Conservation* 125, 169-182.
- Kramer-Schadt, S., Kaiser, T. S., Frank, K., & Wiegand, T. (2011) Analyzing the effect of stepping stones on target patch colonisation in structured landscapes for Eurasian lynx. *Landscape Ecology* 26, 501-513.
- Kvam, T. (1991) Reproduction in the European lynx, *Lynx lynx*. *Zeitschrift für Säugetierkunde* 56, 146–158.
- L'équipe animatrice du Réseau. (2014) Bilan national d'évolution de l'aire de présence détectée du Lynx. Les données du Réseau. *Bulletin Lynx du Réseau*, 19: 26-27.
- Laurent, A., Léger, F., Briaudet, P.-E., Léonard, Y., Bataille, A., & Goujon, G. (2012) Evolution récente (2008-2010) de la population de Lynx en France. *Faune Sauvage*, 294: 38-39.
- Linnell, J.D.C., Breitenmoser, U., Breitenmoser-Würsten, C., Odden, J., & von Arx, M. (2009) Recovery of Eurasian Lynx in Europe: what part has reintroduction played? In: *Reintroduction of Top-Orders Predators*. Edited by M.W. Hayward & M.J. Somers, Conservation Science and Practice Series n°5, Wiley-Blackwell, 72-91.
- Louvrier, J., Duchamp, C., Lauret, V., Marboutin, E., Cubaynes, S., Choquet, R., Miquel, C., & Gimenez, O. (2018) Mapping and explaining wolf recolonization in France using dynamic occupancy models and opportunistic data. *Ecography* 41, 647-660.
- Marboutin E. (2013) Note sur le statut du Lynx dans les Vosges. *Bulletin Lynx du Réseau*, 18: 14-17.
- Marboutin E., Duchamp C., Moris P., Briaudet P.-E., Léger F., Laurent A., Léonard Y. & Catusse M. (2011) Le suivi du statut de conservation de la population de lynx en France : bilan pour la période triennale 2008-2010. *Bulletin Lynx du Réseau*, 17: 24-29.
- Morand, A. (2016) Le Lynx : risques routiers et mesures correctrices – état des lieux et recommandations. Cerema Direction Territoriale Est, 93p.
- Niedziakowska, M., Jedrzejewski, W., Mysajek, R.W., Nowak, S., Jedrzejewska, B., & Schmidt, K. (2006) Environmental correlates of Eurasian lynx occurrence in Poland - Large scale census and GIS mapping. *Biological Conservation*, 133, 63–69.
- Office National de la Chasse et de la Faune Sauvage (ONCFS) (2017) <http://carmen.carmencarto.fr/38/Lynx.map#>
- PNR Vosges du Nord (2013) Charte du Parc naturel régional des Vosges du Nord. Projet de Territoire Horizon 2025. Avis final, 140p.
- Samelius, G., Andrén, H., Liberg, O., Linnell, J.D.C., Odden, J., Ahlqvist, P., Segerström, P., & Sköld, K. (2012) ERC-Lynx / Rapport final
Septembre 2021

- Spatial and temporal variation in natal dispersal by Eurasian lynx in Scandinavia. *Journal of Zoology*, 286, 120–130.
- Savouré-Soubelet, A., & Meyer, S. (2018) Liste hiérarchisée d'espèce pour la conservation en France. Espèces prioritaires pour l'action publique. V2. Mise à jour 2017. UMS 2016 PatriNat. 21p.
- Schmidt, K. (1998) Maternal behaviour and juvenile dispersal in the Eurasian lynx. *Acta Theriologica*, 43, 391–408.
- Schwoerer, M.-L., & Scheid, C. (2016) Le projet « Life Lynx » de réintroduction du félin sur le palatinat Allemand entre dans sa phase opérationnelle. *Bulletin Lynx du Réseau*, 20: 2.
- Stahl, P., & Vandel, J.-M. (1998) Le lynx boréal *Lynx lynx* (Linné, 1758). Encyclopédie des carnivores de France n° 19. Société française pour l'étude et la protection des mammifères, Paris (Muséum national d'histoire naturelle, 57 rue Cuvier, 75231).
- Stiftung KORA 2020. KORA Jahresbericht (2019) KORA Bericht Nr. 90. Juni 2020. 24p.
- Stiftung Natur und Umwelt Rheinland-Pfalz (2015) Wiederansiedlung von Luchses (*Lynx lynx carpathicus*) im Biosphärenreservat Pfälzerwald. EU LIFE+ Natur-Projekt der Stiftung Natur und Umwelt Rheinland-Pfalz, 4p.
- Stiftung Natur und Umwelt Rheinland-Pfalz (2016) Höfken: Die ersten Luchse sind frei! Heute wurden die ersten 3 von insgesamt Heute wurden die ersten 3 von insgesamt 20 Luchsen im Pfälzerwald freigelassen. Mainz, 27.07.2016. Presse mitteilung, 3p.
- Stiftung Natur und Umwelt Rheinland-Pfalz (2017) Arcos est en France. Le lynx suisse a pris une orientation vers le sud et a désormais passé la frontière française. Mayence, le 28.03.2017 Presse mitteilung, 2p.
- Stiftung Natur und Umwelt Rheinland-Pfalz (2019) (2019) <https://snu.rlp.de/de/projekte/luchs/wiederansiedlung/raumnutzung/liste-der-luchse-im-projekt/>
- IUCN France, MNHN, SFEPM, & ONCFS (2009) La Liste rouge des espèces menacées en France – Chapitre Mammifères de France métropolitaine. Paris, France, 12p.
- IUCN France, MNHN, SFEPM, & ONCFS (2017) La Liste rouge des espèces menacées en France – Chapitre Mammifères de France métropolitaine. Paris, France, 16p.
- Vandel, J.-M., Stahl, P., Herrenschmidt, V., & Marboutin, E. (2006) Reintroduction of the lynx into the Vosges mountain massif: From animal survival and movements to population development. *Biological conservation*, 131: 370-385.
- Vandel, J.M., & Stahl, P. (2005) Distribution trend of the Eurasian lynx *Lynx lynx* populations in France. *Mammalia*, 69, 145–158.
- Visintin, C., Ree, R., & McCarthy, M.A. (2016) A simple framework for a complex problem? Predicting wildlife–vehicle collisions. *Ecology and Evolution* 6, 6409-6421.
- Von Arx, M., Breitenmoser-Würsten, C., Zimmermann, F., Kunz, F., Vogt, K., Ryser, A., Struch, M., & Breitenmoser, U. (2017) Der Luchs im Jura - unter besonderer Berücksichtigung des Solothurner Juras. *Naturforschende Gesellschaft des Kantons Solothurn*, 43, 177–234.
- Zimmermann, F., Breitenmoser Wursten, C., & Breitenmoser, U. (2005) Natal dispersal of Eurasian lynx (*Lynx lynx*) in Switzerland. *Journal of Zoology*, 267, 381–395.
- Zimmermann, F., & Breitenmoser, U. (2007) Potential distribution and population size of the Eurasian lynx *Lynx lynx* in the Jura Mountains and possible corridors to adjacent ranges. *Wildlife Biology* 13, 406-416.

Annexes

ANNEXE 1 : Actes de la journée de restitution du projet ERC-Lynx qui s'est tenue en webinaire le 4 juin 2021.



CENTRE D'ECOLOGIE
FONCTIONNELLE
& EVOLUTIVE



Les actes de la Journée de restituation « ERC-Lynx »

04 juin 2021

« Eviter, réduire et compenser la mortalité du Lynx boréal par collision avec les véhicules de transport »



CIL&B
Club Infrastructures
Linéaires et Biodiversité

Projet ITTECOP 2018-2020

ADEME



Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Energie





● Préambule

Ce document constitue une synthèse des différentes interventions réalisées au cours de la journée de restitution du 4 juin 2021, sur la genèse et la présentation de l'outil ERC-Lynx, suite à l'appel à projet ITTECOP 2018-2020. Il s'agit d'une retranscription revisitée, dégageant les points d'informations principaux de chaque sujet abordé, en ajoutant certaines précisions qui nous ont semblés importantes et utiles à la bonne compréhension des étapes et résultats du projet.

L'objectif principal de cette restitution est la valorisation des messages véhiculés lors des présentations, puis des échanges avec l'ensemble des participants présents au cours de cette journée.

En effet, elle a réuni de très nombreux acteurs autour de l'aménagement du territoire et/ou la conservation du Lynx (services de l'état, collectivités territoriales, gestionnaires d'espaces protégés et association de protection de la nature, fédération des chasseurs, gestionnaires d'infrastructures de transports routières et ferroviaires, ...). En conséquence, ce document se veut représentatif de la richesse des collaborations engagées depuis le lancement du projet, les premiers ateliers et le déploiement test de l'outil ERC-Lynx.

L'équipe projet

Référence du document :

Equipe projet ERC-Lynx (2021) Les actes de la journée de restitution du projet ERC-Lynx : Eviter, réduire et compenser la mortalité du Lynx boréal par collision avec les véhicules de transport. Webinaire du 4 juin 2021, Projet ITTECOP 2018-2020, CEFE/Cerema/CROC/OFB. 66 p



● Sommaire :

- **Introduction par l'équipe projet**

Intervention Olivier GIMENEZ (CEFE-CNRS).....	4
Intervention Luc CHRETIEN (CEREMA Est).....	5

- **Présentation du projet ITTECOP**

Intervention Olivier GIMENEZ	7
------------------------------------	---

- **Prise de parole Ministère de la Transition Ecologique**

Intervention Damien PACOU (DGALN/DEB/MTE)	10
---	----

- **Présentation PNA-PRA Lynx : les actions liées aux infrastructures de transport et intégration de l'outil ERC-Lynx**

Intervention Marie-Pierre COLLIN-HUET (DREAL Bourgogne-Franche-Comté).....	15
Intervention Marine ARZUR (DREAL Grand-Est).....	18
Intervention Alain MORAND (CEREMA Est).....	21

- **Présentation de l'outil ERC-Lynx**

Intervention Sarah BAUDUIN (CEFE-CNRS / OFB).....	28
---	----

- **Exemples d'utilisation de l'interface**

Intervention Sarah BAUDUIN(CEFE-CNRS / OFB).....	42
--	----

Condensé Questions/Réponses de la journée.....	53
--	----

- **Bilan et suite pour le projet ERC-Lynx**

Intervention Olivier GIMENEZ (CEFE-CNRS).....	58
Intervention Luc CHRETIEN (CEREMA Est).....	60

- **Clôture de la journée**

Intervention Yannick AUTRET (CGDD/MTE/ITTECOP).....	62
---	----

Liste des participants.....	63
-----------------------------	----

Liste des sigles	64
------------------------	----

Pour en savoir plus.....	66
--------------------------	----

- **Introduction de la journée par l'équipe projet**



Intervention Olivier GIMENEZ (CEFE-CNRS)

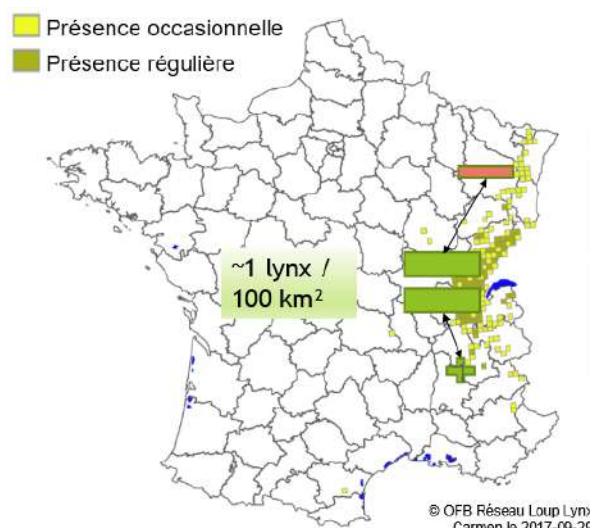
C'est avec grand plaisir que toute l'équipe du projet ERC-Lynx vous accueille aujourd'hui. Près d'une centaine de participants se sont inscrits et réunis pour cette journée de restitution finale de notre projet et Luc CHRETIEN (CEREMA Dter-Est) et moi-même (Olivier GIMENEZ, responsable du projet et directeur de recherche au CNRS à Montpellier) allons ainsi procéder à l'introduction de cette journée.

Nous allons aujourd'hui parler du Lynx boréal (*Lynx Lynx*) en France :

- **Aire de répartition en France :**

Il s'agit d'une espèce qui vit en faible densité, de l'ordre d'un individu au 100 km². Son aire de répartition comprend trois massifs :

- **Le massif des Vosges**, suites aux réintroduction effectuées dans les années 1980-1990. Nous avons observé un déclin constant de l'aire de présence jusqu'en 2016. Bien qu'elle reparte à la hausse depuis 2019, la situation reste tout de même préoccupante.
- **Le Jura**, où l'on observe des populations stables en phase de recolonisation naturelle.
- **Les Alpes**, où l'espèce est en cours d'installation, avec une aire de présence à la hausse.

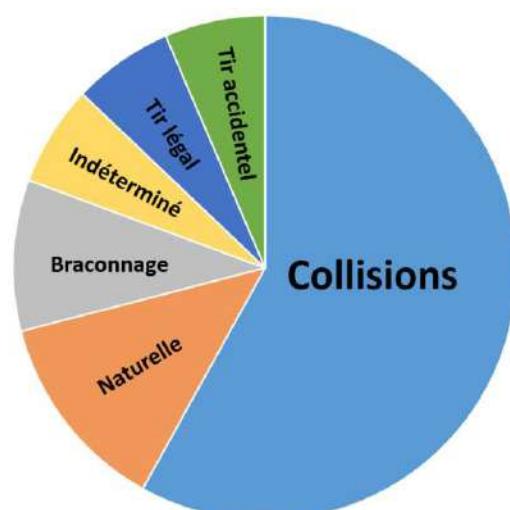


- **Impacts des routes et risques de collisions :**

Les collisions Lynx/Véhicule représentent à elles seules environ 60% de la mortalité globale observée pour cette espèce.

La question se pose alors sur la réduction de ces risques de collisions via deux axes principaux :

- L'aménagements des Infrastructures terrestres de transports (ITTs) pour minimiser leurs impacts.
- Le déploiement des continuités écologiques pour la persistance de cette espèce, qui sont aujourd'hui toujours entravées par les ITTs.





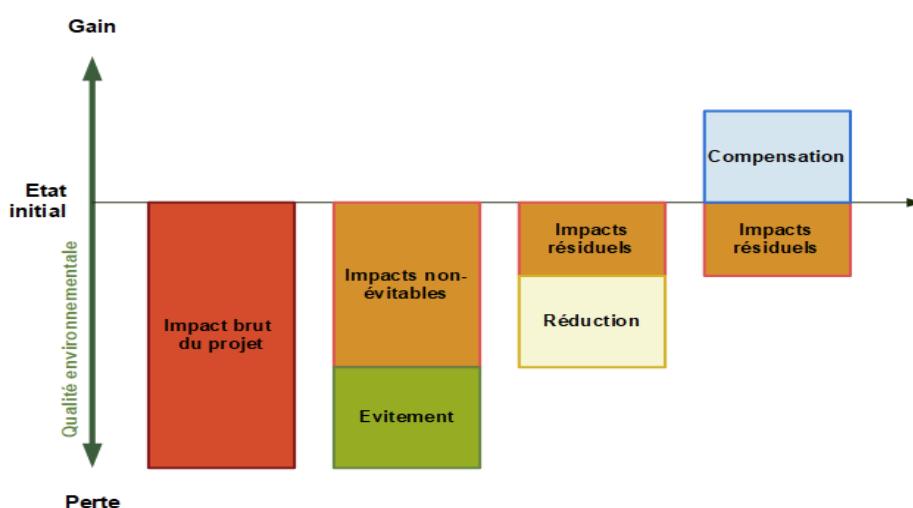
Intervention Luc CHRETIEN (CEREMA Est)

Nous allons beaucoup parler aujourd’hui de la séquence ERC (Eviter Réduire Compenser), qui s’applique pour de nombreuses espèces dont le Lynx. Elle a été largement renforcée depuis sa création, notamment par la loi Biodiversité de 2016, avec :

- Une meilleure formalisation de son organisation (priorité à l’évitement, puis à la réduction et en dernier lieu la compensation).
- Une obligation de résultat pour les mesures de réduction et de compensation a également été mise en place pour systématiser un suivi de l’efficacité de ces mesures.
- Un cadre méthodologique sur le dimensionnement de la compensation sous l’égide du ministère.

Le Lynx présente certaines spécificités qui rendent plus difficile l’application de cette séquence pour cette espèce :

- **Un domaine vital important**, d’une moyenne de 150 à 180 Km² chez les femelles et 260 à 280 Km² dans le Jura.
- **Une distance de dispersion relativement variable** selon plusieurs critères (sexe, densité de congénères, présences de territoires vacants, disponibilité en habitats favorables, obstacles au déplacements).
- **Un milieu de vie forestier**, qui implique une grande sensibilité aux discontinuités anthropiques du paysage.



Ainsi, la mise en place de la séquence ERC pour cette espèce peut être envisagée via plusieurs axes principaux :

- **EVITER ?**

L’évitement des impacts est difficile, bien qu'il s'agisse d'une priorité dans un contexte de diminution de l'habitat favorable et de fragmentation des continuités écologiques. En effet, trouver une alternative d'évitement du domaine vital du Lynx sur un projet d'aménagement du territoire lorsque l'on parle de si vastes surfaces est une difficulté technique importante.



● REDUIRE ?

La réduction des impacts est un outil important via plusieurs axes d'actions :

- **La réduction de l'impact direct** sur les habitats (forêts, prairies, etc.) qui reste cependant un impact faible au vu des surfaces importantes des domaines vitaux.
- **La réduction des impacts sur les continuités écologiques**, plus intéressante dans le cas du Lynx de par une amélioration de la transparence des infrastructures et des aménagements, qui auront un impact sur le risque de collision par répercussion.
- **La réduction du risque direct** des accidents routiers au niveau des ITTs.

Toutes ces mesures vont réduire drastiquement les impacts des infrastructures sur les populations de Lynx, sans pour autant les faire complètement disparaître. Un impact résiduel subsistera, assez difficile à mesurer, et qui devra faire l'objet d'une compensation. Cependant, la réduction reste la solution qui offre le plus de champs d'action pour cette espèce.

● COMPENSER ?

La compensation reste elle aussi délicate à mettre en place pour le cas du Lynx :

- Il sera possible notamment de compenser les surfaces favorables « consommées » par les aménagements, ce qui ne résoudra pas entièrement le problème du fait de l'échelle des surfaces vitales du Lynx.
- Les continuités physiques du paysage pourront être recréer pour palier à la destruction de celles préexistantes.

Référence de l'intervention :

GIMENEZ O. & CHRETIEN L. (2021) Introduction de la journée par l'équipe projet. In: Les actes de la journée de restitution du projet ERC-Lynx : Eviter, réduire et compenser la mortalité du Lynx boréal par collision avec les véhicules de transport. Webinaire du 4 juin 2021, Projet ITTECOP 2018-2020, CEFE/Cerema/CROC/OFB. p 4-6



● Présentation du projet ERC-Lynx 2018-2020

Intervention Olivier GIMENEZ (CEFE-CNRS)

L'équipe du projet « ERC-Lynx » est composée de quatre partenaires respectivement le Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive (CEFE), le Centre d'Etudes et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement (CEREMA Dter-Est), le Centre de Recherche d'Observation sur les Carnivores (CROC) et l'Office français de la Biodiversité (OFB, ex ONCFS).

Ce projet découle de la réponse à un appel à projet du programme de recherche ITTECOP (Infrastructure de Transport Terrestres Ecosystème et Paysage) porté par le ministère de la transition écologique et solidaire et l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie). L'équipe projet « ERC-Lynx » remercie Yannick AUTRET et Judith Raoul-Duval ainsi que toute l'équipe ITTECOP.

Ce projet s'est déroulé sur un peu plus de trois ans (étendue à 2021 dans le contexte Covid-19) avec un budget total de 521.767,50 € dont 79.949,20 € ont été couvert par le financement ITTECOP.

Les partenaires ayant déjà travaillé sur la problématique du Lynx (continuités écologiques et ITTs), le programme n'est pas parti de zéro, avec notamment une implication dans le PRA Lynx massif des Vosges, le programme LIFE de réintroduction dans le Palatinat (Allemagne) et dans les PNA Lynx également.

Voici la composition de l'équipe projet, dont certains intervenants vont s'exprimer au cours de cette restitution finale :

CNRS et CEFE : Aurélie COULON et moi-même (Olivier GIMENEZ)

CEREMA : Alain MORAND, Luc CHRETIEN, Emilie BUSSON, Delphine SOUILLOT et Lucille TOURNIER

CROC : Estelle GERMAIN, Anaïs CHARBONNEL, Charlotte-Anaïs OLIVIER

OFB : Sarah BAUDUIN, Nolwenn DROUET-HOGUET et Christophe DUCHAMP

● Quels sont les objectifs du projets ERC-Lynx ?

La question est : **comment éviter, réduire et compenser le risque de mortalité du Lynx par collision avec les véhicules de transport ?**

Pour ce faire, l'équipe s'est donnée comme objectif d'évaluer l'impact positif ou négatif de la mise en place d'un aménagement sur la viabilité du Lynx via certains indices qui seront présentés au cours de cette journée.

Cette étape passe par la modélisation, qui devait permettre de développer un outil d'aide à la décision qui concerne les aménagements routiers (un tronçon de route ajouté, une route requalifiée) et paysagers (un aménagement urbain, un passage à faune). Ces développements se font ainsi **avec et pour** les acteurs du territoire :



En effet, nous avons adopté une démarche de **co-construction** dès la mise en route du développement de l'outil ERC-Lynx qui sera présentée au cours des prochaines interventions. Le principal souhait étant d'impliquer les acteurs du territoire pour capitaliser sur leurs savoirs et connaissances, ainsi que pour leur meilleure adhésion au projet. Ils sont trop nombreux pour être cités ci-contre, mais toutes les informations sont disponibles sur le site du projet, pour une liste plus exhaustive.



En pratique, cette co-construction a démarré par une réunion de lancement, suivi de trois ateliers et la présente journée de restitution. Les trois ateliers traitaient respectivement des thématiques suivantes :

- **1^{er} atelier** : Explication du modèle et de ses hypothèses
- **2^{ème} atelier** : Réflexion sur une 1^{ère} version de l'outil
- **3^{ème} atelier** : Test en conditions « réelles » de l'outil

L'idée finale est **d'intégrer l'outil développé dans les démarches d'évaluation en lien avec la séquence ERC** comme l'a présenté Luc Chrétien et comme nous allons le développer dans les interventions à venir. Il s'agit d'un travail en cours, qui sera poursuivi avec les DREAL Bourgogne-Franche-Comté et Grand-Est, respectivement dans le cadre du PNA Lynx et PRA Lynx massif des Vosges.

● Remerciements :

L'équipe-projet ERC-Lynx tient à remercier l'équipe du programme ITTECOP, le Conseil Scientifique, le Conseil d'Orientation et les partenaires de ce programme pour le soutien financier, logistique et l'animation scientifique qui a permis sa valorisation.

Ce projet ITTECOP a reçu le soutien de la Direction générale des infrastructures de transports et de la mer (Ministère de la transition écologique), de l'Agence nationale de la recherche (ANR-16-CE02-0007) et de la « Mission pour l'Interdisciplinarité » du programme « Osez l'Interdisciplinarité ».

Le CROC a bénéficié du soutien financier du Commissariat à l'Aménagement du Massif des Vosges (FNADT), de la DREAL Grand Est, de la Région Grand Est, de l'Union européenne dans le cadre du Programme Opérationnel FEDER-FSE Lorraine et Massif des Vosges 2014-2020 (programme



scientifique « Amélioration de l'état de conservation du Lynx boréal dans le Massif des Vosges ») et de l'UEM Fondation d'Entreprise.

Cet outil a bénéficié de l'aide de la plateforme Montpellier Bio-informatique et Biodiversité (MBB) du LabEx CeMEB, ANR du programme « Investissements d'avenir » (ANR-10-LABX-04-01).

Un grand merci à nos stagiaires Delphine SOUILLOT et Charlotte-Anaïs OLIVIER ainsi qu'à Estelle GERMAIN qui n'ont pu être présentes pour cette journée mais dont la contribution au projet a été essentielle.

Des remerciements à Emilie BUSSON, pour l'organisation de cette journée de restitution. Egalement, à Sarah BAUDUIN qui a porté ce projet, qui va beaucoup intervenir dans la présentation de ce dernier et, sans qui, il n'aurait pas pu aboutir.

Enfin, merci au nom de toute l'équipe projet aux participants et participantes présents au cours des ateliers, et qui sont également au rendez-vous de cette journée de restitution.

Référence de l'intervention :

GIMENEZ O. (2021) Présentation du projet ERC-Lynx 2018-2020. In: Les actes de la journée de restitution du projet ERC-Lynx : Eviter, réduire et compenser la mortalité du Lynx boréal par collision avec les véhicules de transport. Webinaire du 4 juin 2021, Projet ITTECOP 2018-2020, CEFE/Cerema/CROC/OFB. p 7-9



- Trame Verte et Bleue, principes « ERC » : outils pour la protection du Lynx

Intervention de Damien PACOU (DGALN/DEB/MTE)

Comme il en a été question précédemment, nous allons voir quelques éléments de contextes généraux ainsi que les grands principes qui concernent la situation du Lynx, son statut de préservation ainsi que les outils pour améliorer sa situation, avant de laisser la parole aux intervenants des DREAL BFC, GE et le CEREMA.

- Le Lynx en France et en Europe :

Les populations :

Son aire de présence régulière nationale est en augmentation constante depuis son retour naturel en France via les réintroductions des populations suisses dans les années 1970, estimée aujourd’hui à 8 800 km² concentrés sur **trois populations**, respectivement des massifs des Vosges, du Jura et des Alpes. Sa présence est consolidée sur le massif du Jura, mais la situation est plus préoccupante au niveau du Massif des Vosges, où son aire de répartition a régressé.

L'estimation des effectifs de Lynx en France ne permet pas à l'heure actuelle de dégager des chiffres officiels. Cependant en Europe occidentale, où l'aire de présence est estimée à 800 000 km², nous pouvons comptabiliser une **dizaine de populations** réparties sur 23 pays (de la Scandinavie au long des massifs montagneux boisés d'Europe centrale jusqu'au Sud-Est des Balkans).

La totalité de la population européenne est estimée entre **9 000 et 10 000 individus**.



Le statut de protection :

Le Lynx est classé parmi les espèces d'intérêt communautaire, dont la conservation nécessite la désignation de **zones spéciales de conservation** (annexe 2 de la directive habitat faune-flore) ainsi qu'en tant qu'espèce **nécessitant une protection stricte** (annexe 4 de la directive habitat Faune-Flore).



Au niveau du droit français, l'arrêté du 23 avril 2007 fixe la liste des mammifères terrestres protégés, dont le Lynx, sur l'ensemble du territoire et les modalités de leur protection. Il est également classé dans la liste rouge de l'IUCN (Union Internationale pour la Conservation de la Nature) des espèces menacées.

Il reste donc très sensible à la fragmentation de son habitat, et les collisions routières représentent l'une des principales causes de mortalités (près de 60%). De ce fait, le rétablissement de son bon état de conservation passe par une levée des freins à sa survie et à sa dispersion, principalement les causes de mortalité anthropiques (collision Lynx/véhicule, obstacles aux déplacements et aux échanges entre les noyaux de populations).

Cette problématique doit être prise en compte dans les politiques d'aménagement du territoire et est essentielle pour réduire ces risques et favoriser le développement de cette espèce notamment via sa dispersion.

Ainsi, son statut de protection européen et français interdit la destruction de tout individu et prévoit un dispositif de protection stricte qui nécessite d'adopter et de mettre en œuvre toutes mesures pertinentes permettant de prévenir les atteintes à l'espèce en particulier celles portant sur les individus et les habitats.

De ce fait, il convient de mobiliser des outils techniques tels que **la trame verte et bleue et la séquence ERC**.

- **La trame vert et bleue :**

Il s'agit d'un **outil d'aménagement du territoire** qui vise à préserver et à reconstituer un réseau de continuités écologiques via les réservoirs de biodiversité et les corridors écologiques, pour que les espèces animales et végétales puissent assurer l'intégralité de leur cycle de vie (alimentation, reproduction, repos).

Elle vise à lutter contre la fragmentation des milieux naturels et participe à la préservation de la richesse faunistique et floristique en s'inscrivant dans les objectifs de l'union européenne pour la biodiversité.

Les collectivités sont ainsi tenues (via l'application de la trame verte et bleue) d'identifier les continuités écologiques présentes sur le territoire et de les intégrer dans les politiques territoriales et les documents de planification.

Pour cela, le document cadre des orientations nationales trame verte et bleue pour la préservation et la remise en bon état des continuités écologiques (ONTVB) précise les objectifs et les grandes lignes directrices de la trame verte et bleue. Les documents de planifications régionaux tels que les SRADDET (Schéma Régional d'Aménagement, de Développement Durable et d'Egalité des Territoires, le SRCEA (Schéma Régional du Climat, de l'Air et de l'Energie) en île de France, le PADDUC (Plan d'Aménagement et de Développement Durable de la Corse) en Corse et le SAR (Schéma d'Aménagement Régional) en outre-mer doivent prendre en compte le décret adaptant ces orientations nationales lors de leur élaboration. Ces éléments doivent se retrouver déclinés dans les documents de planification comme les SCOT (Schéma de cohérence territoriale), les PLU (Plan Local d'Urbanisme) et les PLUi (Plan Local d'Urbanisme intercommunal). Ces ONTVB comportent en annexes des listes par région des espèces sensibles à la fragmentation et qui doivent devenir un objectif prioritaire dans la mise en œuvre de la



trame verte et bleue. Le Lynx se trouve donc dans ces listes pour les régions dans lequel il évolue. Au vue de l'écologie de cette espèce, la trame verte et bleue devra s'attarder sur les **trames forestières** des régions concernées en ciblant les obstacles au droit de ces dernières comme la déforestation, l'ouverture du milieu, les infrastructures de transport, et tenter de les résorber.

- La séquence ERC (Eviter, réduire, compenser) :

Cette séquence est la déclinaison technique et opérationnelle des engagements internationaux, communautaires ou nationaux en matière de préservation des milieux naturels et prévention des atteintes à la biodiversité. Il s'agit de l'un des principes généraux du code de l'environnement (article L. 110-1). Ce dernier explicite précisément la séquence ERC, orientée vers un objectif écologique visant l'absence de perte voire le gain de biodiversité.

De ce fait, le principe de l'action préventive et de correction est adopté par priorité à la source des atteintes à l'environnement, en utilisant les meilleures techniques disponibles, à un coût économiquement acceptable. Il permet d'éviter les atteintes à la biodiversité et aux services qu'elle fournit, d'en réduire la portée, ou de les compenser en dernier lieu (lorsqu'elles n'ont pas pu être évitées ni réduites) en prenant en compte les espèces, les habitats naturels et les tronçons écologiques affectés.

La séquence ERC vise ainsi à concilier le développement économique et les enjeux environnementaux et doit constituer le fil conducteur d'intégration de l'environnement dans les documents de planification et les projets d'aménagement du territoire.

Il convient d'intégrer le **plus tôt possible** la prise en compte de l'environnement dans la conception d'un plan, d'un programme ou d'un projet (choix de la localisation, etc.) afin qu'il soit le moins impactant possible pour l'environnement. Ses aménagements et infrastructures doivent être conçus selon la séquence ERC, que ce soit pour les travaux en eux-mêmes ou pour le fonctionnement de l'installation. Dans le cas du Lynx, cela passe par la préservation des connexions écologiques et l'évitement ou la réduction des mortalités dites accidentelles. Si ce n'est pas le cas, les interdictions portant sur les espèces protégées ne seront pas respectées et le "système de protection stricte" de l'espèce ne sera pas effectif.



La mise en œuvre de la séquence pour le Lynx dans le cadre du fonctionnement des infrastructures de transports nécessite la mobilisation des meilleures techniques pour maintenir les connections et éviter et/ou réduire les mortalités. La bonne application de la séquence nécessite donc un **suivi**.



environnemental pour apprécier l'efficacité des mesures en place et appliquer des mesures correctrices si nécessaire.

- **Exemple du Lynx ibérique (*Lynx pardinus*) en Espagne :**

Une expérience similaire à la séquence ERC a été menée en faveur du rétablissement de cette espèce, qui reste l'une des espèces de mammifère les plus menacées en Europe puisque le Lynx ibérique ne comptait plus qu'une centaine d'individus en Espagne dans les années 2000.

Un projet LIFE Iberlince débuté en 1994, que l'union européenne a fortement soutenu a vu le jour. Il a permis le développement d'une série d'actions visant à améliorer la connectivité des habitats et à réduire de 30% le taux de mortalité du Lynx ibérique lié aux collisions routières. Ces actions se sont caractérisées par la construction et l'adaptation de passages à faune, la mise en place de clôtures spécifiques et le déploiement d'une signalisation et d'une limitation de vitesse adaptées. Le ministère des travaux publics et de l'urbanisme en Espagne a été fortement associé à ce projet pour minimiser les risques de collisions routières.

Aujourd'hui, la population estimée approche les 1000 individus en Espagne et au Portugal.



- **Conclusion**

Le préfet de région Bourgogne-Franche-Comté mandaté pour coordonner un **Plan National d'Action (PNA)** en faveur du Lynx, et sa rédaction a été confiée à l'ONCFS, devenu OFB, qui assure le suivi de l'espèce sur le territoire.

Il aura notamment pour objectif d'agir sur les menaces directes et les freins identifiés à la conservation et au développement des populations de Lynx, dont le manque de connectivité entre les trois populations françaises (Jurassienne, Vosgiennes, Alpines) et les risques de collisions.

Il s'appuiera notamment sur les outils développés dans le cadre du **Programme ITTECOP ERC-Lynx** (Eviter, Réduire, Compenser la mortalité du Lynx par collision avec les véhicules de transport)

Enfin, le Plan Régional d'Action (PRA) du Massif des Vosges, lancé avant le PNA, constituera une déclinaison régionale du PNA.

Référence de l'intervention :

PACOU D. (2021) Trame Verte et Bleue, principes « ERC » : outils pour la protection du Lynx. In: Les actes de la journée de restitution du projet ERC-Lynx : Eviter, réduire et compenser la mortalité du Lynx boréal par collision avec les véhicules de transport. Webinaire du 4 juin 2021, Projet ITTECOP 2018-2020, CEFE/Cerema/CROC/OFB. p 10-13



- Présentation PNA-PRA : Les actions liées aux infrastructures de transport et intégration de l'outil ERC-Lynx

Intervention Marie-Pierre COLLIN-HUET (DREAL BFC) :

Nous travaillons au sein de la DREAL Bourgogne-Franche-Comté (BFC) à l'élaboration d'un Plan National d'Action en faveur du Lynx en partenariat avec l'Office National de la Chasse et la Faune Sauvage, devenu en janvier 2020, l'Office français de la Biodiversité (OFB).

- Qu'est-ce qu'un PNA ?

Il s'agit d'un outil instauré par le code de l'environnement (article L400-11-3) qui ne possède pas de portée réglementaire. Il s'agit d'un document stratégique qui cherche à rétablir et pérenniser le **bon état de conservation d'une espèce donnée**.

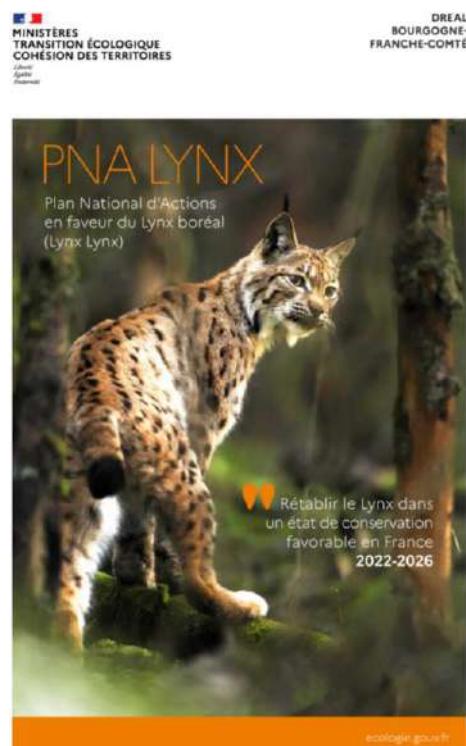
L'état de conservation d'une espèce est considéré comme favorable lorsque les effectifs sont suffisamment élevés pour qu'elle puisse se maintenir à l'échelle d'un territoire. A l'inverse, lorsque ces effectifs sont trop faibles pour qu'elle subsiste en l'état, l'espèce est alors considérée comme prioritaire pour l'action publique (définie par le Muséum National d'Histoire Naturelle, MNHN). C'est dans ce contexte là que peut se faire valoir une action ministérielle qui déployera l'outil PNA.

Deux types de PNA sont identifiables :

- Les **PNA de rétablissement**, qui se caractérisent par des actions visant à améliorer la situation biologique d'une espèce donnée.
- Les **PNA de conservation**, qui portent sur le plus long terme et qui visent à assurer la conservation d'une espèce visée.

Il s'agit donc d'un outil de **mobilisation et de fédération des acteurs** pour créer une synergie favorable entre l'ensemble des initiatives et pour restaurer le bon état de conservation des populations considérées.

Le Lynx étant une espèce strictement protégée au niveau international (convention de Berne), du fait de ses faibles effectifs européen et français, une décision ministérielle en août 2018 a déclenché la mise en place du PNA, dont l'élaboration a été déléguée au préfet de Bourgogne-Franche-Comté avec





la coordination de la DREAL BFC et l'appui de l'OFB. Cette décision s'est inscrite dans le contexte d'une dynamique antérieure initiée dans le massif des Vosges (PRA LMV) et à l'échelle nationale (WWF et SFEPM).

Un travail de dialogue a débuté en Janvier 2019 entre l'ensemble des parties prenantes très diverses autour du **projet de PNA**. Ce dernier vise à être approuvé fin 2021, et s'étendra sur une durée de cinq ans dans un premier temps (du fait de son statut de grand prédateur). Ce PNA Lynx se structure autour de **14 objectifs prioritaires** qui seront développés dans cette présentation.

Sa stratégie principale est **d'agir sur les menaces directes et les freins identifiés** à la conservation et au développement des populations actuelles (collisions, destructions illégales, manque de connectivité entre les populations, etc.), tout en travaillant à une **meilleure acceptation de l'espèce** avec l'ensemble des parties prenantes.

Pour atteindre ces objectifs, la démarche de dialogue engagée dès l'origine doit se poursuivre à l'image par exemple les rencontres telle que cette journée de restitution, qui ont été engagées sur des bases d'appropriation de connaissances scientifiques et des leviers d'actions.

Voici un schéma de gouvernance du PNA que nous proposons de faire vivre pendant la durée de déploiement des actions :



Au vu du domaine de répartition de cette espèce, sur les massifs des Vosges, des Alpes et du Jura, quatre régions sont concernées par la mise en place des actions : la région Grand Est, Bourgogne-Franche-Comté, Auvergne-Rhône-Alpes et Provence Alpes Côtes d'Azur. Ces champs géographiques importants nécessitent une territorialisation des actions via la création de **groupes techniques**.

Un **Comité de pilotage national** a régulièrement été réuni à chaque étape d'élaboration ainsi qu'un **Conseil scientifique** qui accompagne les travaux de création et de mise en œuvre du PNA. Ce conseil éclaire le comité de pilotage en émettant des recommandations et en examinant les actions et les thématiques développées au cours de la création de ce PNA.

Ce dernier étant structuré autour de trois grands axes, nous souhaitons garder une cohérence par axe via la création de secrétariat technique, regroupant les pilotes des actions et les membres des équipes projets (fédérations de plusieurs structures). L'animation et la coordination reviennent quant à elles à la DREAL BFC avec l'appui de l'OFB.



- **Calendrier de finalisation du PNA :**

- **8 juin 2021** : Examen du projet par le COPIL
- **6 juillet 2021** : Examen du projet par le CNPN
- **Septembre 2021** : Consultation du public sur le PNA
- **Courant décembre 2021** : Approbation ministérielle du PNA

- **Structure du PNA :**

Le PNA est ainsi structuré en quatre grands axes majeurs d'actions :

- **Axe 1 : Améliorer les conditions de coexistence avec les activités humaines**

Cet axe contient l'objectif qui est en lien direct avec le projet ITECCOP ERC-Lynx, c'est à dire l'amélioration de la connectivité et la réduction des collisions au niveau des ITTs. Mais il présente également d'autres objectifs de médiations et de communications telle que la réduction des conflits avec les activités d'élevage et l'amélioration de la coexistence avec les activités cynégétiques. Enfin, plus globalement, cet axe s'applique à étudier les questionnements de dérangement du Lynx et de la perception de l'espèce auprès du public.

- **Axe 2 : Réduire les menaces sur la viabilité de l'espèce et lever les freins à son expansion**

Cet axe s'articule autour de six objectifs que sont le renforcement du suivi des populations, l'amélioration des connaissances en génétique des populations, l'organisation de la surveillance sanitaire, la caractérisation du régime alimentaire et de la prédatation, la lutte contre les destructions illégales (l'une des deux causes principales de mortalité de l'espèce) et enfin la prise en charge et la réhabilitation des Lynx en détresse.

- **Axe 3 : Communiquer, sensibiliser et valoriser**

Cet axe regroupe des actions autour de la communication, de la sensibilisation vers un public varié, et de l'éducation autour de l'espèce. Ces actions prendront appui sur des exemples pertinents réalisés dans les pays limitrophes, via un volet de coopération internationale (comme par exemple le cas du Lynx ibérique en Espagne).

- **Axe 4 : Animer le PNA**

Ce dernier axe vise à animer, coordonner et également suivre et évaluer le plus objectivement possible les résultats et les impacts des actions concrètes du PNA, afin de pouvoir mieux appréhender les mesures à prendre à l'avenir pour réhabiliter le bon état de conservation du Lynx en France (action sur le long terme).

Référence de l'intervention :

COLLIN-HUET M-P. (2021) Présentation PNA-PRA : Les actions liées aux infrastructures de transport et intégration de l'outil ERC-Lynx. In: Les actes de la journée de restitution du projet ERC-Lynx : Eviter, réduire et compenser la mortalité du Lynx boréal par collision avec les véhicules de transport. Webinaire du 4 juin 2021, Projet ITTECOP 2018-2020, CEFE/Cerema/CROC/OFB. p 14-16



• Le PRA Lynx Massif des Vosges et l'outil ERC-Lynx

Intervention de Marine ARZUR (DREAL Grand-Est)

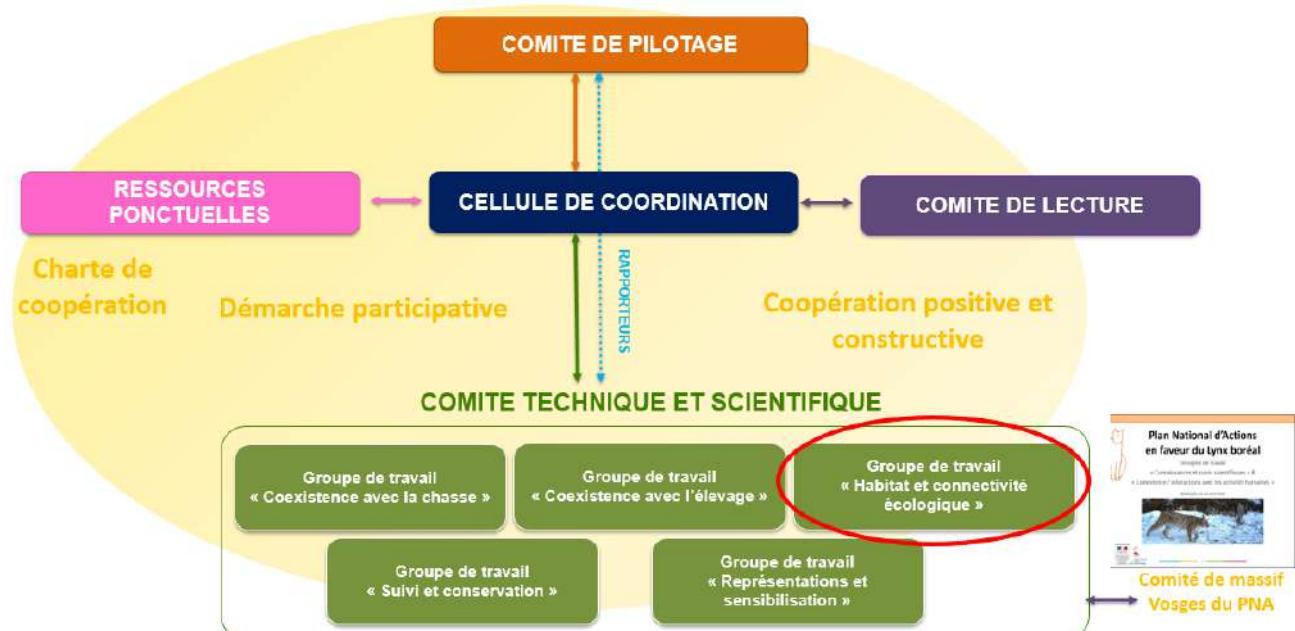
• Historique du PRA Lynx Massif des Vosges :

Comme évoqué précédemment, le Plan Régional d'Actions (PRA) Lynx Massif des Vosges est une démarche qui a été lancée en 2016, avant la mise en place du PNA Lynx, du fait d'un contexte particulier pour ce noyau de population de Lynx :

- La population vosgienne-palatine à laquelle appartient le noyau vosgien est en danger critique d'extinction (liste rouge UICN).
- Les effectifs de Lynx du noyau vosgien sont très faibles (quelques individus actuellement identifiés).
- Le Massif des Vosges joue le rôle de noyau stratégique de connexion au sein de la métapopulation du Rhin Supérieur qui inclut, avec lui, le Massif du Jura (France et Suisse), la forêt du Palatinat et la Forêt Noire en Allemagne.

Phase 1 : Phase rédactionnelle du PRA et de ses actions / 2016-2019

En réponse à cette situation critique, la rédaction du PRA Lynx Massif des Vosges (initialement nommé Programme Lynx Massif des Vosges / PLMV) a été lancée en 2016 à l'initiative du Centre de Recherche et d'Observation sur les Carnivores (CROC). Cette démarche pour rétablir le Lynx dans un état de conservation favorable dans le Massif des Vosges a été dès le départ soutenue par la DREAL Grand Est et d'autres partenaires comme la Région Grand Est et le Commissariat à l'Aménagement du Massif des Vosges. Elle s'est inscrite dans le cadre d'une démarche concertée et partagée avec les acteurs du territoire.





Le cœur du travail de rédaction de cette phase réalisée par le biais d'une démarche participative, s'appuie en particulier sur le comité technique et scientifique, lui-même composé de cinq groupes de travail (voir Figure ci-dessus). Les thématiques de ces groupes de travail sont en lien direct avec les cinq enjeux de conservation du Lynx dans le massif. Au fil des rencontres et des échanges, les actions issues des réflexions de chaque groupe de travail ont été validées selon la méthode du gradient de consentement. En d'autres termes, aucune action n'a été intégrée dans le PRA sans le consentement de tous les acteurs. Ce principe de fonctionnement a contribué au déploiement d'une coopération constructive et positive dans le respect de chacun. La durée relativement longue de la phase rédactionnelle du PRA s'explique par ce travail de co-construction des actions.

L'outil ERC-Lynx a quant à lui été intégré au niveau des actions « **Habitat et connectivité écologique** ».

A noter, au sein de la gouvernance du PNA Lynx, le comité technique et scientifique du PRA fait office de « Comité de massif Vosges », impliquant une forte mise en cohérence entre les deux démarches PNA et PRA.

Phase 2 : Phase opérationnelle de mise en œuvre des actions / 2020-2029

La phase opérationnelle du PRA Lynx Massif des Vosges a débuté en 2020 pour une durée de 10 ans, afin de mettre en œuvre les actions nécessaires à la prise en compte des enjeux définis par ordre de priorité :

- **Enjeu 1** : Faciliter la coexistence avec les activités humaines (chasse, élevage)
- **Enjeu 2** : Restaurer la connectivité écologique entre massifs (Jura / Vosges / Palatinat / Forêt-Noire) et maintenir un habitat favorable au sein du Massif des Vosges
- **Enjeu 3** : Réduire la mortalité d'origine anthropique (collisions et destructions illégales)
- **Enjeu 4** : Consolider le réseau d'observateurs et développer des coopérations (régionales et transfrontalières) pour un meilleur suivi et une meilleure protection du Lynx
- **Enjeu 5** : Diffuser les connaissances sur le Lynx et sensibiliser sur les enjeux liés à sa conservation

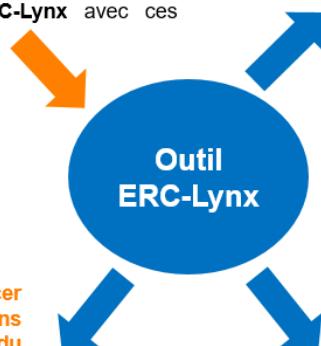
Au total, ce sont 18 actions qui devront être mises en œuvre pour rétablir le Lynx dans un état de conservation favorable dans le Massif des Vosges d'ici 2029, avec un bilan à mi-parcours.

- **Intégration de l'outil ERC-Lynx au sein du PRA**

L'outil ERC-Lynx a été intégré dans plusieurs actions de l'axe de travail « **Habitat et connectivité écologique** » du PRA répondant aux enjeux 2 et 3 (voir paragraphe précédent), comme celle concernant la communication et l'information aux gestionnaires d'infrastructures (action 9B), l'évaluation et le renforcement de la prise en compte du Lynx dans la gestion et l'aménagement du territoire (action 7B) ainsi que dans les politiques publiques liées aux infrastructures de transports (action 8C). L'action 6 prévoit également que l'outil ERC-Lynx évolue à l'avenir en s'appuyant sur le développement des connaissances sur l'habitat du Lynx, les corridors et les obstacles aux déplacements.



Action 6 / Affiner les connaissances sur l'habitat, les corridors et les obstacles aux déplacements du Lynx : cartographier, caractériser et hiérarchiser l'habitat du Lynx ainsi que les corridors potentiels
→ Voir dans quelles mesures il est possible d'alimenter l'outil **ITTECOP ERC-Lynx** avec ces résultats.



Action 7B) Évaluer et renforcer la prise en compte du Lynx dans la gestion et l'aménagement du territoire

Action 9B) Informer les gestionnaires, les aménageurs et les décideurs

→ Informer les services instructeurs et les gestionnaires de l'existence de l'outil ERC-Lynx (projet ITTECOP) afin de systématiser la prise en compte du Lynx dans les projets d'aménagement du territoire, transmettre les documents ressources et proposer des formations.

Action 8C) Évaluer et renforcer la prise en compte du Lynx dans les politiques publiques liées aux infrastructures de transport

Dans ce cadre, la DREAL Grand-Est s'est engagée à travailler d'abord en interne puis en collaboration avec d'autres administrations (services instructeurs) pour promouvoir l'intégration de l'outil ERC-Lynx dans les procédures d'instruction de dossiers d'autorisation et de gestion d'espaces naturels d'une part et, d'autre part, développer son appropriation.

- Un exemple de la phase opérationnelle : « Rétablir de manière prioritaire la connectivité au niveau du Col de Saverne » (action 8A)

Cet exemple se situe au niveau de l'autoroute A4 qui relie Strasbourg à Paris et qui coupe le massif des Vosges du Nord et le reste du massif en deux (du fait du contexte géographique du col de Saverne).

Au niveau des continuités écologiques, le col de Saverne a toujours été un point problématique pour la bonne cohérence écologique et est considéré comme un « point noir bloquant » par le Schéma Régional de Cohérence Ecologique (SRCE) d'Alsace repris dans le Schéma régional d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires (SRADDET) Grand Est, adopté en Janvier 2020.

Il implique une coupure dans un corridor écologique d'importance régionale et surtout européenne (le Massif des Vosges reliant la forêt du Palatinat et le Massif du Jura). Jusqu'à présent, il n'existe qu'une « passerelle à gibier » pour palier à cela, construite en même temps que l'autoroute A4 en 1976. Elle est aujourd'hui considérée comme largement inadaptée d'un point de vue technique comme nous pouvons le voir sur les images ci-dessous (faible largeur, trop anthropisée, etc.). La connectivité écologique n'y est donc pas suffisamment rétablie au vu de l'importance européenne de ce passage.



Données cartographiques : © IGN, Planet Observer



M. Marc, CROC 2015 / J.-C. Génot, Parc naturel régional du massif des Vosges du Nord 2019)

Grâce au groupe de travail mis en place dans le cadre de l'action 8A du PRA, il a été décidé de lancer une nouvelle étude en 2021-2022 autour du rétablissement de la continuité écologique au col de Saverne, à l'initiative du concessionnaire autoroutier Sanef, en ouvrant le dialogue avec la DREAL Grand Est, la Région Grand Est, le CEREMA, le PNR des Vosges du Nord, l'OFB et le CROC. Le Lynx est l'espèce mis en avant pour la réalisation de cette étude, qui restera cependant très bénéfique pour les autres cortèges faunistiques qui transitent entre le massif des Vosges du Nord et le reste du massif (Vosges Moyennes, Hautes-Vosges, Vosges du Sud). Cette étude s'appuie sur un partenariat entre la Sanef, la DREAL Grand-Est et la Région Grand-Est avec une assistance à maîtrise d'ouvrage portée par le CEREMA. Elle prévoit un suivi écologique de la passerelle et une recherche de scénarios soutenables de localisation de la/ou des nouvelle(s) solution(s) de traversées des espèces.

Pour plus d'informations, un site internet est entièrement dédié au PRA qui présente tous les renseignements sur son historique, ses objectifs et ses actions sur la durée du plan :

<https://sites.google.com/view/programmelynxfmassifdesvosges/accueil>

Vous pouvez consulter les sites de la DREAL Grand-Est :

<http://www.grand-est.developpement-durable.gouv.fr/plan-regional-d-actions-Lynx-massif-des-vosges-a20093.html>

Référence de l'intervention :

ARZUR M. (2021) Le PRA Lynx Massif des Vosges et l'outil ERC-Lynx In: Les actes de la journée de restitution du projet ERC-Lynx : Eviter, réduire et compenser la mortalité du Lynx boréal par collision avec les véhicules de transport. Webinaire du 4 juin 2021, Projet ITTECOP 2018-2020, CEFE/Cerema/CROC/OFB. p 17-20



• Les actions liées aux infrastructures de transport et l'outil ERC-Lynx

Intervention Alain MORAND (CEREMA Est)

Suite aux exposés de Marie-Pierre COLLIN-HUET (DREAL BFC) et Marine ARZUR (DREAL GE), cette présentation fait le focus sur l'outil ERC-Lynx et son articulation dans les quatre actions du plan d'action national (PNA) en relation aux infrastructures de transport.

Leurs objectifs sont ainsi l'amélioration des connectivités et les échanges entre les populations de Lynx, ainsi que la réduction de la mortalité liée aux collisions.

Action 1 :

Résoudre rapidement certains points noirs clés (ex. ouvrage de franchissement).

Action 2 :

Alimenter l'outil ITTECOP, le développer et le mettre à disposition.

Action 3 :

Communiquer auprès des aménageurs

Action 4 :

Effectuer une campagne de sensibilisation auprès des automobilistes dans les zones à risques

Action 1 : Résoudre *rapidement* certains points noirs clés (notamment, et en priorité) en relation aux trames vertes et corridors

Elle est l'action prioritaire des cinq premières années du PNA. Elle s'articule autour de plusieurs enjeux :

- **Résoudre les points noirs identifiés et connus comme particulièrement « accidentogènes »**

Ces points noirs ont été identifiés, notamment grâce aux études précédemment réalisées, comme l'étude Gaillard et al., 2012 lors d'un précédent appel à projet du programme ITTECOP et plus récemment celle du CEREMA (Morand, 2016) à la demande de la Direction de l'Eau et de la Biodiversité (DEB).

Trois secteurs ou « hot spots » représentent à eux seuls 30% des collisions dans le massif du Jura :

- Route nationale 57, section Pontarlier à Jougne (Doubs)
- Route nationale 5, section Morbier (Jura)
- Route départementale 470 section Villards-d'Héria (Jura)

Ces tronçons routiers capitalisent parfois jusqu'à plus de 8 collisions par an pour certaines années (2004, 2008, 2011 par exemple)

Sur la dernière décennie, une moyenne de 7 collisions a été enregistrée sur l'ensemble de la mortalité par véhicule pour le Lynx. L'année 2021 est quant à elle particulièrement accidentogène pour des raisons encore à approfondir.

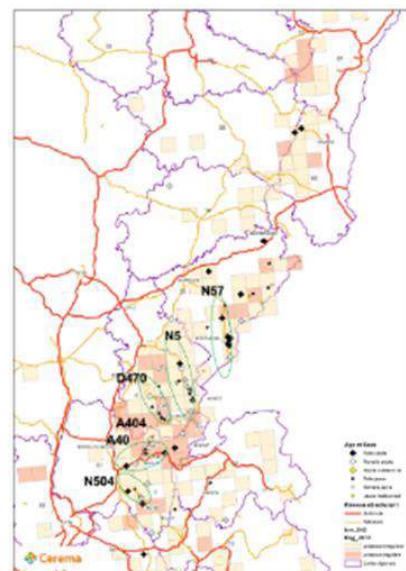


Fig.9. Location of the most accident-axes on the map 2012 of the areas of presence of Lynx (dead lynx caused by collision = colorful and different size cross in relation to age and sex).



Au-delà de ces trois principaux tronçons, d'autres routes ci-contre (anciennement nationales devenues départementales) sont particulièrement sujettes aux collisions sur ce territoire :

- **Département du Jura** : D471, D1083, D436, D69, D52
- **Département de l'Ain** : D1504, D1084 et D1206
- **Département du Doubs** : D437 et D683

- Concentrer l'attention sur certains points connus et leurs solutions peu couteuses et « relativement » simples à déployer

Au-delà de l'importance de la résolution de ces hots spots identifiés, nous avons des remontées d'informations sur des sites particuliers pour lesquels les solutions sont possibles, peu couteuses et assez « simples » à mettre en place. Il est alors intéressant de se concentrer sur ce type de site pour en réduire l'impact sur le Lynx. C'est le cas notamment des exemples suivants :

➤ Collisions sur routes :

- **Site de l'écopont d'Orchamps Venne (D461)**, identifié accidentogène en 2011 par l'ONCFS (ex OFB) qui présente une étanchéité de clôture insuffisante.

- **Site de traversées fréquentes** entre un milieu forestier et une prairie au niveau d'une route départementale (Jura). Le trafic est caractérisé par une vitesse relativement rapide des automobilistes au niveau de ce tronçon en virage (réunion OFB/APPR/FDC39/CEREMA, stage M2 2018).

➤ Collisions sur autoroutes :

- Site de l'échangeur de Nantua (A40/A404), historiquement renseigné comme à risque de collision du fait d'un accès facile et direct des individus à la route, ainsi que la présence d'une clôture grillagée à maille large (inefficace pour les jeunes Lynx).

<https://www.estrepublicain.fr/faits-divers-justice/2021/01/11/un-lynx-tue-sur-la-rn-57-a-jougne-le-cinquieme-en-un-an>

Un lynx tué sur la RN 57 à Jougne : le cinquième en un an

Un lynx a été tué vendredi suite à une collision, sur la RN 57, à la sortie de Jougne (Doubs). Le jeune animal n'a malheureusement pas survécu à ses blessures. Les agents de l'Office français pour la biodiversité (OFB) se sont rendus sur les lieux et ont procédé aux premières constatations.



Site de collisions sur routes



Site de collision sur autoroutes



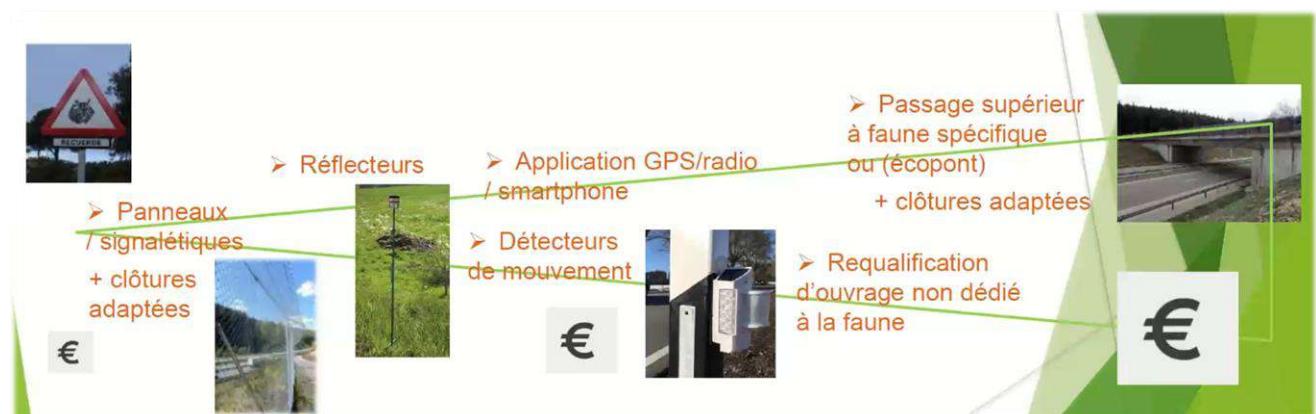
➤ Collisions sur voies ferrées (mineures mais existantes) :

- Site proche d'Artemare où une collision a été renseignée en 2019 du fait de la présence d'une clôture perméable à la faune. (Agent SNCF, blog d'un naturaliste. S. Gatti, 22 octobre 2019 : SNCF/OFB/CEREMA).



- Mettre en œuvre des mesures correctrices adaptées et proportionnées aux enjeux (à court, moyen et plus long terme) et évaluer leur efficacité des effets « barrière/filtre » ...

Qu'il s'agisse des points noirs identifiés et cas plus isolés de mortalité par collision, la réponse doit être proportionnée aux enjeux.



Ces mesures correctrices sont variées. L'illustration ci-dessus en représente plusieurs d'entre elles, avec de la gauche vers la droite une augmentation des coûts, des moyens et travaux à mettre en œuvre. En effet, il peut s'agir de simples panneaux signalétiques (ex. en Espagne pour le Lynx ibérique) associés ou non à des limitations de vitesse ou d'un petit linéaire de clôtures à la pose de réflecteurs (coût relativement faible de l'ordre de quelques milliers d'euros), ou encore la mise en œuvre de détecteurs de mouvements (une centaine de milliers d'euros) jusqu'au déploiement d'éco-ponts (jusqu'à un demi-millions d'euros).

Quelques soient les mesures prises et mises en place, celles-ci doivent être accompagnées d'une évaluation, ce qui est actuellement très souvent oublié.

Le choix et la priorisation des actions concrètes à engager ainsi que les recherches de financements découleront de la concertation **d'un ou plusieurs groupes multi-partenarial** à mettre en place rapidement au lancement du PNA.



Action 2 : Alimenter l'outil ERC-Lynx, le développer et le mettre à disposition

Cette action, qui sera abordée de manière plus approfondie par les prochains intervenants de l'équipe ERC-Lynx tout au long de ce colloque, se base sur deux objectifs principaux :

- **Affiner les connaissances en lien avec les risques de collisions**

Il s'agira notamment d'étudier les habitats, les corridors et les obstacles potentiels (ITT, etc.) sur les déplacements du Lynx.

- **Affiner les connaissances sur les variables « transports »**

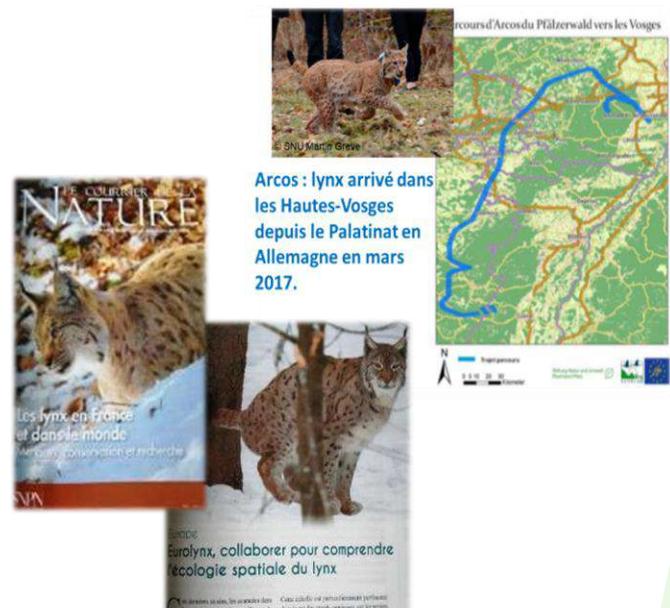
Il s'agira d'identifier, d'affiner et de mobiliser ces connaissances, en travaillant auprès des organismes détenteurs des données existantes mais non accessibles facilement. Dans le cas où des données manquantes seraient identifiées, une collaboration sera envisagée pour leur collecte.

Exemple d'une composante biologique du modèle ERC-Lynx, les mouvements du Lynx :

Cette composante (développée ultérieurement plus en détails par Sarah BAUDUIN dans son intégration dans le modèle individu-centré), s'appuie sur toutes les connaissances acquises des comportements et déplacements des Lynx en interaction avec leur environnement spatial, donc les interactions avec les infrastructures de transport. L'observation des franchissements d'infrastructures de transport et des déplacements de cette espèce du fait notamment de son écologie et de ses motivations au sein de son domaine vital (dispersion des individus, recherche de partenaire en période de rut, parcours du territoire, etc.), sont des paramètres essentiels à renseigner pour la construction du modèle. Il manque actuellement des données de ce type en France.

Malgré le fait que cela ne fasse pas partie aujourd'hui des actions prioritaires du PNA, une collaboration à terme avec les pilotes et partenaires d'actions déjà en place est envisagée pour une mobilisation de telles données préexistantes.

Nous pouvons citer notamment les données de télémétrie dans les Hautes-Vosges qui peuvent renseigner sur le comportement face aux routes et autoroutes du Lynx Arcos, qui s'est déplacé du Palatinat (Allemagne) vers le massif des Vosges en 2017. Certaines collaborations sont déjà en cours, comme par exemple celle avec le groupe « EuroLynx » à l'échelle européenne, pour mutualiser et renseigner les connaissances sur les comportements de cette espèce lors des franchissements des ITTs (réseaux routier, autoroutier, etc.).





Action 3 : Communiquer auprès des aménageurs et gestionnaires d'ITT

Cette action est déjà bien avancée de par la dynamique même du projet « ERC-Lynx » du programme ITTECOP qui a été un réel vecteur d'information et de sensibilisation de la problématique « Lynx, collision et transparence écologique ». De nombreux échanges constructifs ont eu lieu, notamment lors des ateliers mais également lors d'autres rencontres initiées pendant les stages mais aussi à l'initiative de certains des acteurs à ces ateliers (ex. SNCF réseau, APRR, ...). Elles ont donc réuni des partenaires du projet, notamment aménageurs et gestionnaires d'infrastructures de transports :

- Présentation auprès des conseils départementaux du Doubs, Jura (service « route et environnement »)
- Présentation auprès de SNCF Réseau Développement durable du 28 novembre 2019 à Paris
- Présentation auprès d'APRR du 22 janvier 2020 à Lyon
- Présentation prévue le 25 juin 2021 (pilotage de la journée « gestionnaire d'infrastructure de la région BFC) pilotée par le CEREMA Centre-Est

Bien que cette action ait bien démarré, elle demeure un enjeu majeur qui doit continuer de se déployer autour du projet ERC-Lynx.

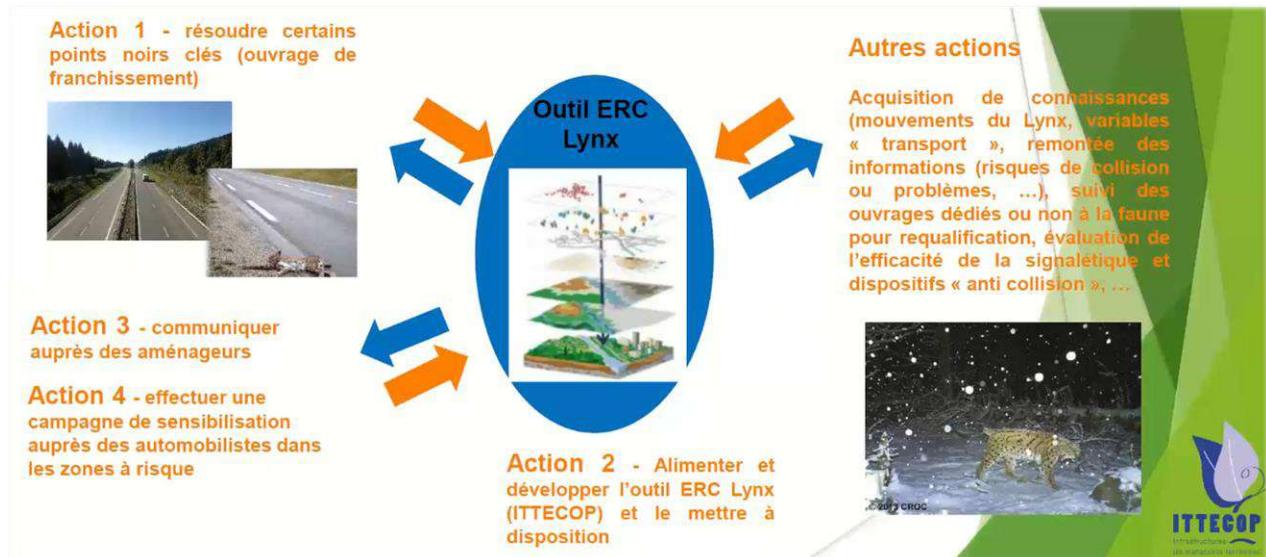
Action 4 : Effectuer une campagne de sensibilisation auprès des automobilistes dans les zones à risques

Ce type de campagnes de sensibilisation reste encore à construire de manière structurée. Malgré cela, quelques actions ont déjà été initiées par des associations de protection de la nature (centre Athénas, WWF, ...), ainsi que par les différents acteurs du projet « ERC-Lync », via les informations radios ou autres médias de communication.

Cette dernière action sera donc à développer et organiser dans le cadre du PNA et également du PRA pour le territoire du massif des Vosges.

- Conclusion et perspectives :

En guise de conclusion et avant de poursuivre par la présentation concrète du projet ERC-Lynx par Sarah BAUDUIN, le schéma ci-après tente un résumé des actions développées et leurs relations. Certaines d'entre-elles sont déjà fonctionnelles (schématisés par les flèches visibles), d'autres seront à reformuler et questionner, sous forme d'échanges et de débats au cours de cette journée ainsi que dans le déroulement du PNA ultérieurement. L'outil ERC-Lynx demeure au cœur de ces actions, à court, moyen et plus long terme.



Pour mener à bien toutes ces actions, il s'agira d'avoir une mobilisation active de financement et des moyens humains à la hauteur de ces ambitions. Il s'agira aussi de saisir les opportunités (communications, partenariats, etc.) qui se présenteront...

Aussi, un travail collaboratif et multi-partenarial sera nécessaire pour le bon déroulé de ce projet, la mise en œuvre d'actions et/ou de projets à petites ou grandes échelles (projets Life, etc.).

Référence de l'intervention :

MORAND A. (2021) Les actions liées aux infrastructures de transport et l'outil ERC-Lynx In: Les actes de la journée de restitution du projet ERC-Lynx : Eviter, réduire et compenser la mortalité du Lynx boréal par collision avec les véhicules de transport. Webinaire du 4 juin 2021, Projet ITTECOP 2018-2020, CEFE/Cerema/CROC/OFB. p 21-26



● Présentation de l'outil ERC-Lynx

Intervention de Sarah BAUDUIN (OFB)

Nous allons maintenant présenter l'outil ERC-Lynx, un outil d'aide à la décision qui renseigne les aménageurs de l'impact de différents types d'aménagements sur les populations de Lynx en France.

L'outil peut renseigner de quel pourrait être l'impact sur les populations de Lynx lors de la mise en place d'un passage à faune, de la restauration d'un milieu en zone forestière, ou de la création d'un nouveau tronçon routier par exemple. Il évalue ainsi les impacts positifs, négatifs ou nuls des aménagements routiers et paysagers à travers quatre indices qui renseignent sur la viabilité du Lynx :

- **Le nombre de collisions entre Lynx et véhicules**
- **Le taux d'occupation par des femelles résidentes**
- **Le nombre de passage de Lynx en dispersion**
- **La densité de Lynx**

Cet outil a été co-construit avec et pour les acteurs locaux comme l'a précédemment expliqué Olivier GIMENEZ.

Il s'appuie sur un modèle qui simule le devenir des populations de Lynx en reproduisant les processus écologiques de cette espèce tout en incluant l'effet des routes et de l'habitat.

● L'outil ERC- Lynx :

L'outil a deux composantes : un **modèle de viabilité de Lynx** couplé à une **interface utilisateur**.

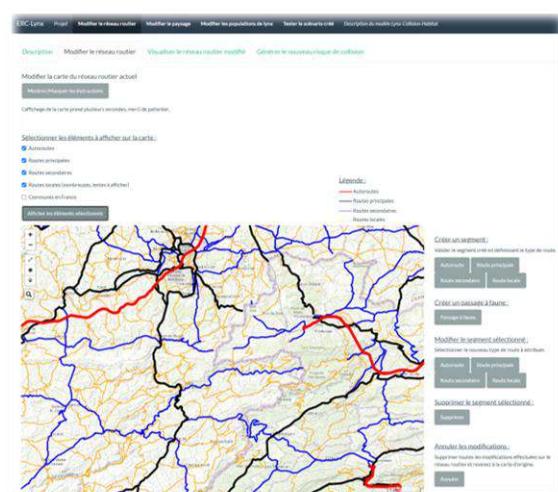
➤ Le modèle de viabilité de Lynx

Ce modèle biologique simule le devenir des populations de Lynx dans un paysage donné, tout en prenant en compte l'effet du réseau routier et des habitats du Lynx. Ce modèle « **Lynx-Collisions-Habitat** » va permettre d'estimer les quatre indices de viabilité du Lynx précédemment cités.

➤ L'interface utilisateur

La deuxième composante est l'interface qui permet à toute personne d'utiliser le modèle de viabilité du Lynx.

Similaire à une page internet, l'utilisateur va y créer le scénario d'aménagement qu'il souhaite tester. Il va pouvoir modifier le paysage en créant divers aménagements de manière interactive sur l'interface, puis l'outil va « appeler » le modèle de viabilité de Lynx qui va simuler le devenir des populations de Lynx dans ce nouveau paysage modifié. Ensuite, les quatre indices de viabilité du Lynx pour ce scénario d'aménagement vont être calculés. Chaque indice va être comparé à la valeur obtenue dans la situation initiale (paysage sans modification) et c'est cette **mesure différentielle** avant/après pour chaque indice,





c'est-à-dire la variation (positive, négative ou nulle) de la valeur de chaque indice entre la situation initiale (paysage sans modification) et la situation calculée (paysage modifié par les aménagements créés par l'utilisateur) qui va être retournée à l'utilisateur.

Cette interface se veut **facile d'utilisation** pour que toute personne, même sans connaissances en statistiques ou modélisation, puisse utiliser le modèle. Elle doit également être utile et pouvoir répondre aux questions des aménageurs. Les utilisateurs doivent pouvoir tester les différents aménagements qu'ils souhaitent et obtenir des résultats utiles. Enfin, l'interface et l'outil en général doit être accepté par les acteurs du territoire, qui doivent comprendre son fonctionnement pour avoir confiance dans les résultats produits.

Ce sont ces trois points principaux : la facilité d'utilisation, l'utilité de l'outil et la compréhension de ses résultats, qui ont été travaillés avec les participants lors des trois ateliers pour essayer de produire un outil qui soit **le plus adapté possible**.

- **Le modèle Lynx-Collision-Habitat**

- **Intégration de l'impact du réseau routier**

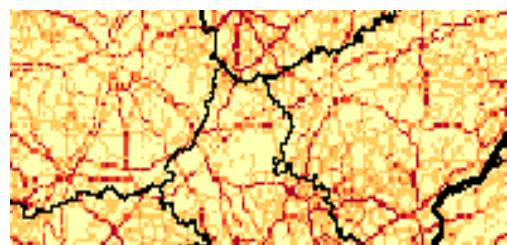
Grâce aux données de collisions du Réseau Loup-Lynx et des caractéristiques du réseau routier français, nous avons créé un modèle de collisions pour expliquer et **prédir le risque de collision** entre Lynx et véhicules. Le but étant de produire une carte de probabilité de collisions sur toute notre aire d'étude en fonction des différentes caractéristiques du réseau routier.



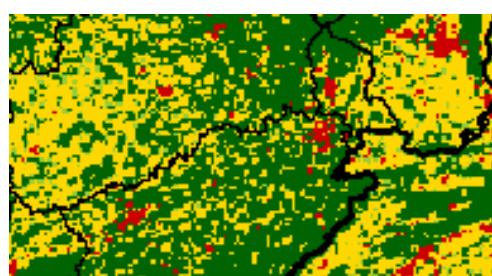
- **Intégration de l'impact du couvert paysager**

Avec les données de présence du Lynx du Réseau Loup-Lynx (de 1994 à 2017) et les données Corine Land Cover, nous avons construit un modèle d'habitat du Lynx pour prédir la répartition dans l'espace des différents habitats (favorables et défavorables) du Lynx sur notre aire d'étude.

Probabilités de collisions



Habitats du Lynx





➤ Intégration des populations actuelles (théoriques) de Lynx

Grâce aux données du Réseau Loup-Lynx et de partenaires en Suisse et Allemagne, nous avons recréer de manière théorique une carte des populations actuelles de Lynx sur notre aire d'étude (c'est-à-dire un nombre théorique d'individus localisés dans les aires de présence de chaque population).



➤ Intégration des processus écologiques du Lynx

Enfin, nous avons utilisé diverses données et recherches publiées sur le Lynx pour définir les règles des différents processus écologiques du Lynx modélisés (reproduction, mortalité, dispersion, établissement de territoires).

Journal of Applied Ecology, 2004
41, 711–721

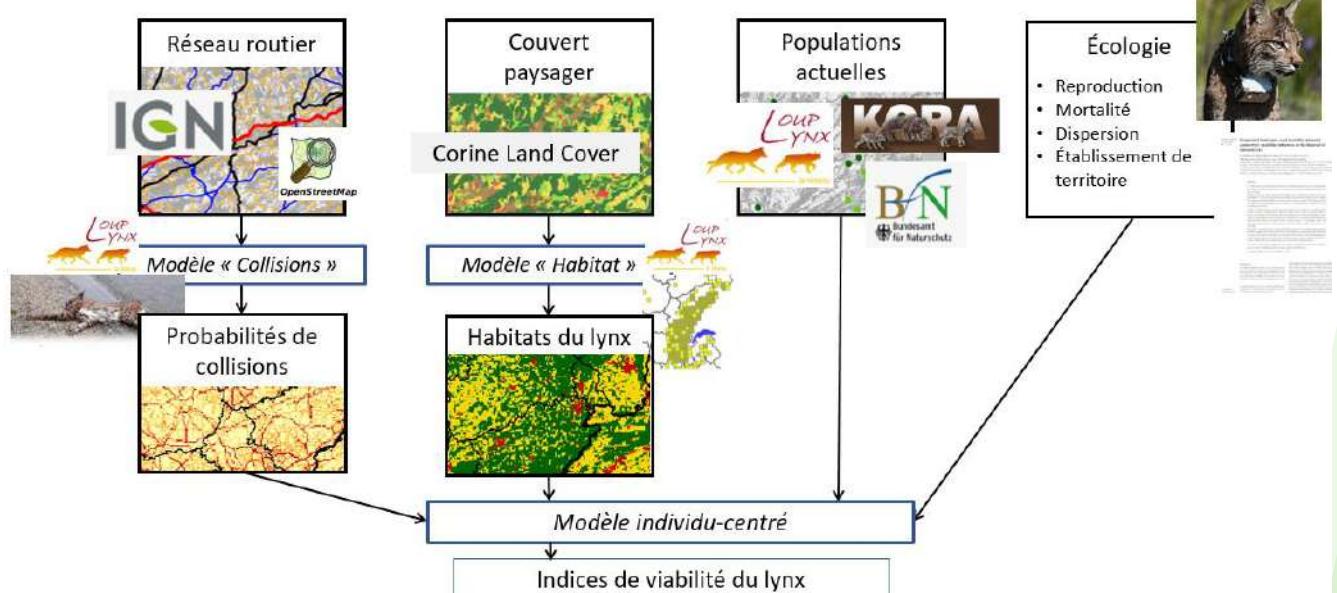
Fragmented landscapes, road mortality and patch connectivity: modelling influences on the dispersal of Eurasian lynx

STEPHANIE KRAMER-SCHADT^{1,2}, ELOY THORSTEN WIEGAND³ and URS BREITEN

¹Department of Ecological Modelling, UVZ Centre for Environmental Sciences, University of Bayreuth, 95448 Bayreuth, Germany; ²Department für Ökologie, Lebensraum für Landschaften und Biotop, Hochanger 6, D-84315 Freising-Weihenstephan, Germany; ³Instituto de Botánica, Centro Superior de Investigaciones Científicas, Avda. de Botánica, 1, 28049 Madrid, Spain; ⁴Institute of Veterinary Virology, University of Bonn, Lennéstrasse 4, D-5310 Bonn, Germany



Les cartes de probabilité de collisions, des habitats du Lynx, des populations actuelles de l'espèce, ainsi que les règles définies pour reproduire les différents processus écologiques du Lynx ont été intégrés dans un modèle dit « **individu-centré** » qui va simuler le devenir des populations de Lynx sur 50 ans en fonction du paysage donné. Une fois les simulations finies, les 4 indices de viabilités sont calculés avec les sorties du modèle individu-centré.





● Le modèle individu centré

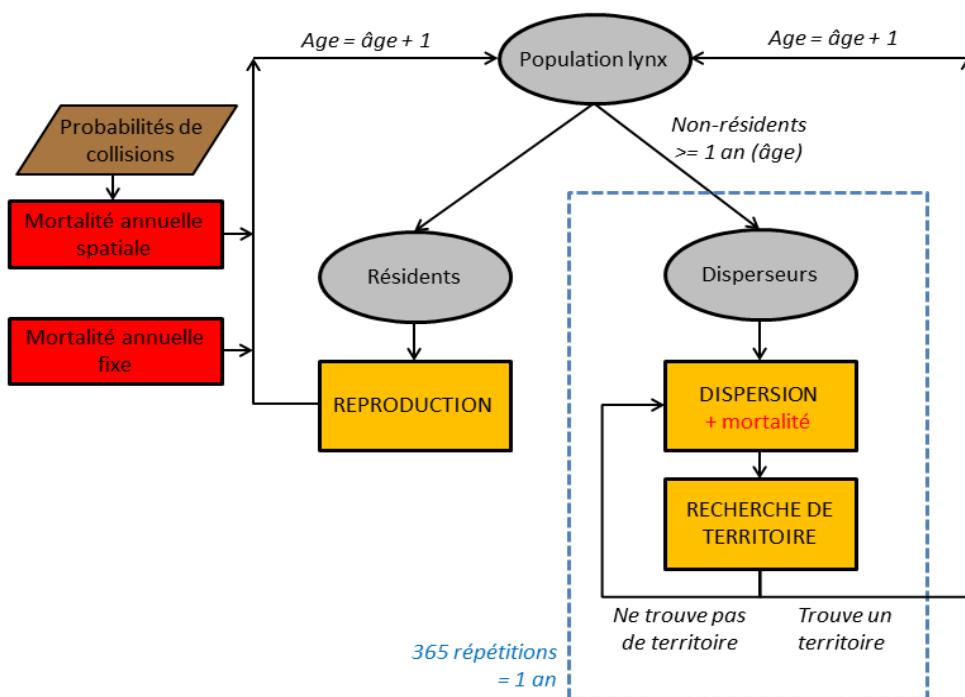
Le modèle individu-centré simule le devenir des populations de Lynx dans le temps.

Les individus simulés sont soit **résidents**, c'est à dire établis sur un territoire, soit **disperseurs**, c'est-à-dire sans territoire et âgés de plus d'un an, ce sont des jeunes qui ont quitté leur mère à la recherche d'un nouveau territoire.

Les résidents se reproduisent, et peuvent ensuite mourir, en fonction de la mortalité annuelle fixe, identique pour tous les résidents, et de la mortalité annuelle spatiale, qui dépend de la carte de probabilités de collisions, et qui va donc être différente en fonction de la localisation des résidents.

Les disperseurs quant à eux vont d'abord disperser, c'est-à-dire se déplacer dans le paysage. Ils peuvent mourir pendant la dispersion, ou alors survivre et ainsi rechercher un territoire où s'établir. Si un individu en dispersion ne trouve pas de territoire, il continuera à se déplacer quotidiennement tout au long de l'année jusqu'à trouver un territoire.

Au bout d'un an, tous les Lynx vieillissent d'un an et la boucle recommence pour le temps de la simulation, c'est-à-dire 50 ans pour notre modèle.



● Zoom sur la simulation de la dispersion du Lynx

Les Lynx simulés se déplacent sur une grille de cellules de 1 km². Chaque cellule a un type d'habitat attribué, c'est-à-dire qu'elle peut correspondre à :

- Un habitat d'installation
- Un habitat de dispersion
- Un habitat matrice
- Un habitat barrière

Ces habitats sont définis par la carte d'habitats du Lynx estimée par le modèle habitat.



Le Lynx se déplace sur le paysage de cellule en cellule, une cellule à chaque pas. À chaque déplacement, 9 cellules sont disponibles, c'est-à-dire celle de sa position actuelle (puisque l'il peut rester sur place) et les huit environnantes.

- Etape n°1 : Choix du type d'habitat

La première étape est le choix du type d'habitat dans lequel l'individu va se rendre pour son prochain pas. Si toutes les cellules sont constitués d'un **habitat favorable** (habitat d'installation ou de dispersion), le disperseur va choisir ce type d'habitat. Si toutes les cellules sont de **type matrice**, c'est l'habitat matrice qui va être choisi. Par contre, si les cellules disponibles sont partagées entre **habitat favorable et matrice**, le choix de l'individu va pencher préférentiellement pour une cellule d'habitat favorable avec cependant une probabilité de 0.03 pour que l'individu se déplace sur une cellule de type matrice. **Les cellules barrières ne sont jamais sélectionnées**, car le Lynx ne les emprunte jamais, ces cellules ne sont donc jamais prises en compte dans le choix.

- Etape n°2 : Choix spécifique de la cellule

Une fois que le type d'habitat est sélectionné pour le prochain pas, il y a un choix au niveau de la cellule en particulier, parmi toutes celles du type d'habitat sélectionné. Ce choix est fait en fonction de la direction. Il y a un maintien de la direction dans 50% du temps, c'est-à-dire que le Lynx va favoriser une cellule en face de lui, dans la continuité de son précédent mouvement. Le choix va être fait pour une cellule qui va le faire dévier un minimum de sa précédente direction. Lorsqu'il n'y a pas de maintien de direction, le choix de la cellule devient aléatoire dans le type d'habitat sélectionné en première étape.

- Etape n°3 : Utilisation de la mémoire de l'individu

Une fois la cellule sélectionnée, le Lynx peut utiliser sa mémoire. Pour ne pas qu'il se retrouve coincé dans un patch d'habitat de mauvaise qualité trop longtemps, il peut faire appel à sa mémoire pour retourner dans un habitat favorable, qu'il a précédemment traversé.

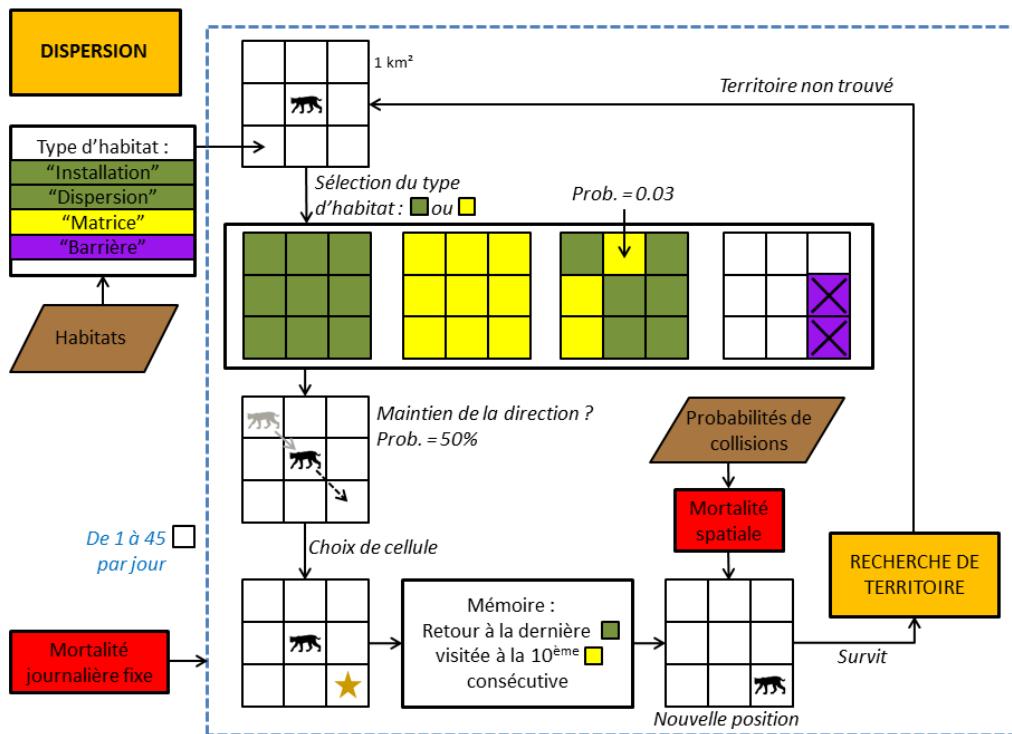
De ce fait, si la cellule choisie est une cellule **matrice** pour la dixième fois (donc dix pas consécutif dans ce type d'habitat), le Lynx va faire appel à sa mémoire pour retourner sur la dernière cellule d'**habitat favorable** (donc habitat d'installation ou de dispersion) qu'il a visité.

- Etape n°4 : Déplacement de l'individu

Une fois la cellule sélectionnée (à l'étape 2 ou l'étape 3), le Lynx va s'y déplacer. Sur cette nouvelle cellule, le disperseur peut mourir par collision (« mortalité spatiale ») défini par la carte de probabilité de collisions estimée par le modèle de collision.

Si le Lynx survit, il peut établir son territoire à cet endroit. Dans le cas où cette nouvelle localisation ne convient pas, il va continuer de se déplacer jusqu'à trouver un nouveau territoire (déplacement entre 1 et 45 fois par jour soit 1 à 45 km/jour).

A la fin de la journée, tous les disperseurs subissent une mortalité journalière fixe et les survivants continueront de se déplacer de jour en jour en répétant les étapes précédentes jusqu'à trouver un territoire où s'établir.



- Stratégie de recherche de territoire des disperseurs

Une fois le Lynx en place sur une nouvelle cellule, il y a 2 stratégies d'établissement de territoire selon le sexe de l'individu disperseur :

- Les femelles établissent leur territoire en fonction de la **qualité de l'habitat**

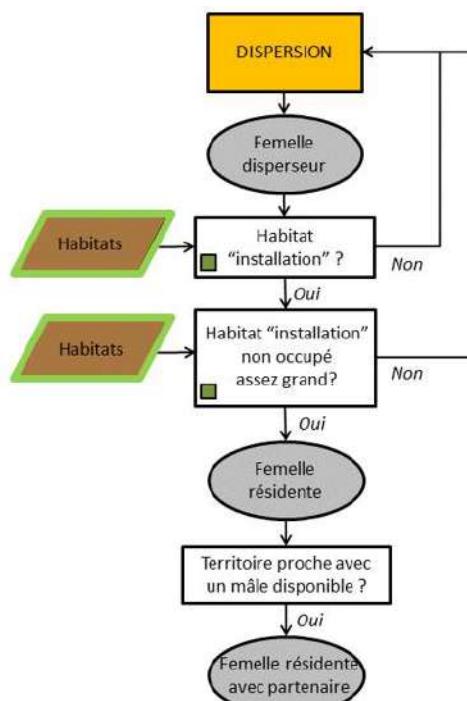
Une femelle disperseur regarde d'abord si la nouvelle cellule sur laquelle elle se trouve est un habitat d'installation ; dans le cas contraire, elle continue de se disperser.

Elle regarde ensuite si elle se trouve dans un patch de plusieurs cellules d'habitat d'installation contigus :

- Si le patch n'est pas assez grand elle va continuer de se disperser).
- Si le patch est assez grand, elle va y définir son territoire et devenir « résident ».

Ces 2 étapes dépendent donc de la carte d'habitat.

Ensuite, elle va regarder si un mâle résident est disponible à proximité pour se reproduire avec lui l'année d'après.

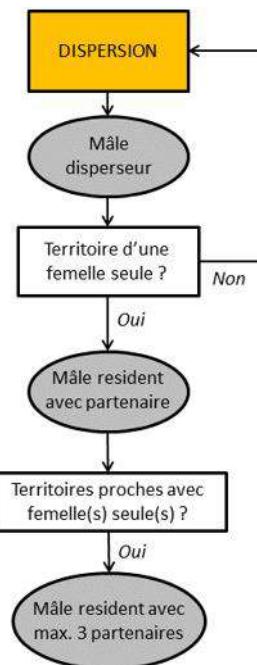




- Les mâles établissent leur territoire en fonction de la **présence des femelles**

Un mâle disperseur regarde si la cellule sur laquelle il vient d'arriver appartient à un territoire d'une femelle résidente seule ; dans le cas contraire, il continuera de se disperser. Si c'est le cas, il devient « résident » et partenaire de cette femelle et pourra se reproduire avec elle l'année d'après.

Enfin, il regarde aussi s'il y a, à proximité, d'autres femelles résidentes seules. Dans ce cas, il devient partenaire de ces autres femelles. Un mâle résident peut avoir jusqu'à 3 femelles partenaires.



- **Évaluation d'un scénario d'aménagement**

L'utilisateur peut agir sur trois des quatre composants du modèle pour représenter les aménagements qu'il souhaite tester.

- **Le réseau routier**, qui va modifier la carte de probabilités de collisions et influencer différemment les mortalités spatiales des individus simulés.
- **Le couvert paysager**, qui va modifier la carte des habitats du Lynx et par conséquent influencer différemment tous les processus qui en dépendent (la dispersion et la recherche de territoire).
- **Les populations actuelles**, qui vont modifier les populations initiales théoriques qui vont être simulées et ainsi faire varier les scénarios futurs des populations simulées.

Toutes ces modifications vont donc influer sur le devenir des populations simulées et entraîner une variation des valeurs d'indices de viabilité du Lynx qui sont calculés avec les résultats de simulations.

Via l'interface utilisateur, différents types d'aménagements peuvent être testés :

- **Au niveau du réseau routier :**

L'utilisateur peut créer un nouveau tronçon routier ou un passage à faune, modifier le type de route d'un tronçon routier existant (par exemple, modifier une route secondaire en route principale) ou supprimer un tronçon routier existant.



- **Au niveau du couvert paysager**

L'utilisateur peut modifier la répartition spatiale des différents types de couvert en remplaçant un type couvert par un autre (par exemple en changeant une zone agricole en zone forestière, ou une prairie en zone urbaine).

- **Au niveau des populations actuelles théoriques**

L'utilisateur peut créer, déplacer ou retirer des individus.



- **L'interface utilisateur**

L'interface se présente à la manière d'une page internet classique, avec différents onglets pour naviguer:

- **Onglet de présentation**

Le premier onglet « **Projet** » est descriptif et présente l'intérêt de l'outil dans la séquence ERC, une brève description de l'outil (comment l'utiliser utilisation, ses limites etc.), et enfin l'équipe projet, les partenaires et les financements.

- **Onglets de travail**

Il existe trois onglets de travail où les utilisateurs vont modifier des caractéristiques de l'environnement pour créer leur scénario d'aménagement, nommés respectivement « **Modifier le réseau routier** », « **Modifier le paysage** » et « **Modifier les populations de Lynx** » :

- **Modifier le réseau routier :**

C'est au niveau de cet onglet (et sous-onglet du même nom) que l'utilisateur va pouvoir réaliser diverses modifications du réseau routier de manière interactive. Le déroulé des manipulations (que l'on peut masquer ou afficher) est expliqué en détail en haut de la page.

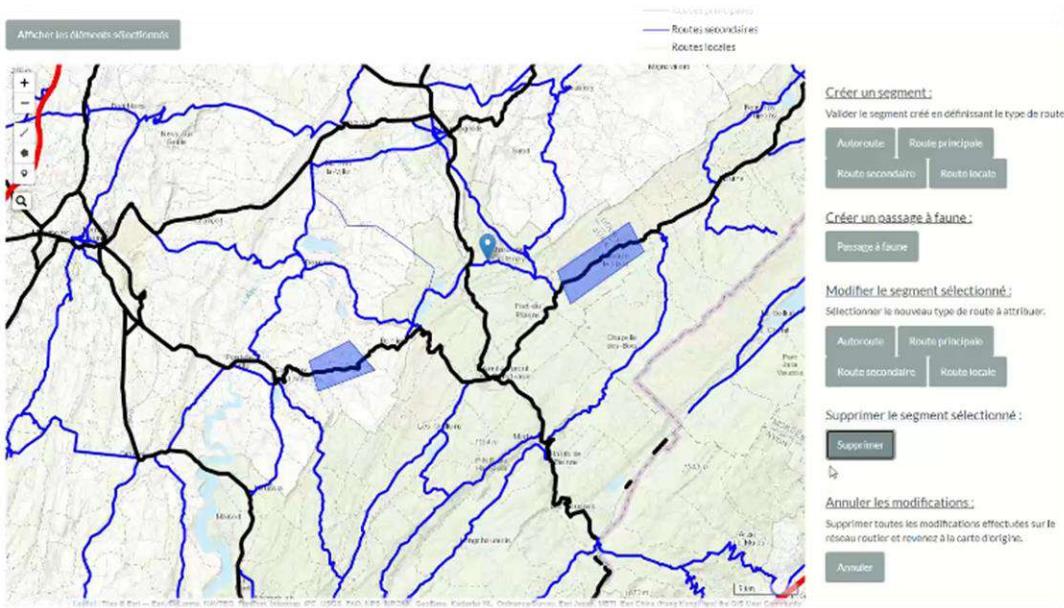
Une carte est affichée et représente via un rectangle noir, l'aire maximale d'utilisation de l'outil. L'utilisateur va rechercher sa zone d'étude par zoom ou via une barre de recherche (recherche de commune, ville, etc.). Le réseau routier peut ensuite être affiché avec quatre catégories de routes :

- **Les autoroutes**

- **Les routes secondaires**

- **Les routes principales**

- **Les routes locales**

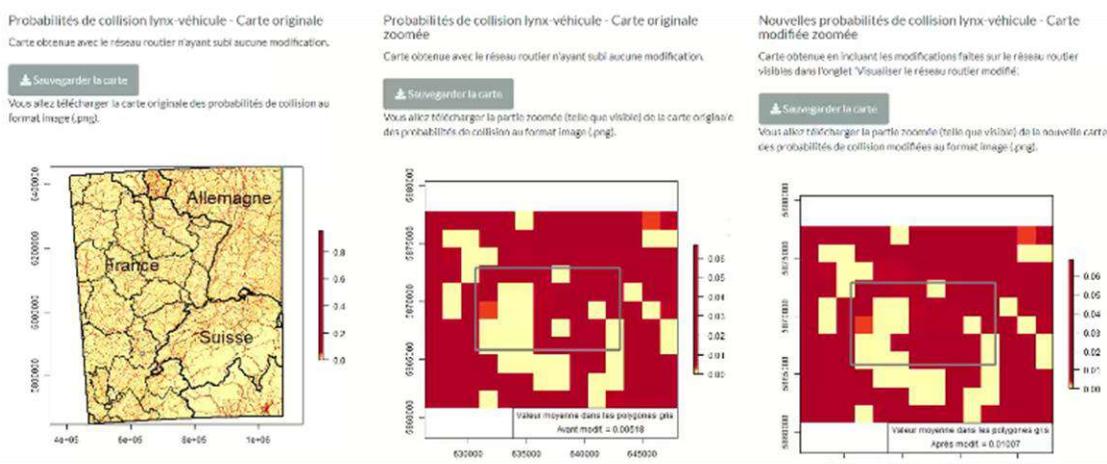


Différents outils sont utilisables pour modifier le réseau routier : créer un tronçon routier d'un certain type de route, créer un passage à faune, modifier le type de route d'un tronçon existant ou supprimer un tronçon routier existant.

Une fois toutes les modifications réalisées sur le réseau routier, elles sont visualisables dans le sous-onglet « Visualiser le réseau routier modifié », qui résume toutes les opérations de l'utilisateur sur le réseau routier.

La dernière étape sera la création de la nouvelle carte du risque de collision (dans le sous-onglet « Générer le nouveau risque de collision »), générée à partir de toutes les modifications de l'utilisateur, qui devra valider ses manipulations en cochant les conditions affichées sur l'interface de l'outil.

Le modèle de collision va s'exécuter et générer les résultats dans ce sous-onglet au côté de la carte d'origine du risque de collision (à gauche), avec la carte d'origine des probabilités de collisions zoomée au niveau de la zone d'étude et, à droite, la nouvelle carte des probabilités de collisions, aussi zoomée sur la zone d'étude, estimée en prenant en compte toutes les modifications faites par l'utilisateur sur l'environnement. Les cartes peuvent être sauvegardées via les différents boutons de sauvegarde.





➤ Modifier le paysage :

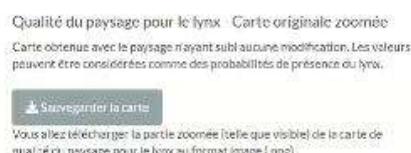
Cet onglet se présente de la même manière que l'onglet précédent (« Modifier le réseau routier »), avec plusieurs sous onglets similaires. Les manipulations sont relativement identiques.

Sur la carte zoomée sur la zone d'étude, l'utilisateur peut afficher le couvert paysager. Un seul outil permet de modifier le couvert. La zone que l'utilisateur ciblera en créant un polygone pour la délimiter sera sélectionnée et l'intégralité de son couvert paysager sera modifiée selon un nouveau type choisi. Il est possible de réaliser autant de polygones que de modifications souhaitées. Lors d'une zone de superposition, le couvert modifié retenu sera celui du polygone le plus récent.

Les modifications réalisées sont visibles dans le sous-onglet « Visualiser le paysage modifié » et les cartes de résultats seront ensuite générées dans le sous-onglet « Générer la nouvelle qualité d'habitat ».

Les résultats obtenus se présentent sous deux jeux de cartes

- Une carte de la **qualité de paysage initiale**, avec des valeurs comprises entre 0 et 1 (valeurs d'« occupancy ») représentant une qualité de paysage pour le Lynx.



De la même manière que les résultats du réseau routier, il y a la carte d'origine (à gauche), la carte d'origine zoomée sur la zone d'étude et, à droite, la carte de valeurs modifiées (résultante du modèle d'habitat) zoomée sur la zone d'étude qui inclus toutes les modifications faites par l'utilisateur sur l'environnement.

- Une **carte d'habitats catégorisés du Lynx** : habitats d'installation, de dispersion, matrice ou barrière.

De la même manière, nous pouvons visualiser la carte d'habitats catégorisés originelle (à gauche), la carte d'origine zoomée sur la zone d'étude accompagnée des proportions de chaque type d'habitat, et, à droite, la carte des habitats modifiés (catégorisés avec la carte de qualité d'habitat modifiée), zoomée sur la zone d'étude, qui inclus toute les modifications faites par l'utilisateur sur l'environnement, avec les nouvelles proportions de chaque type d'habitat.

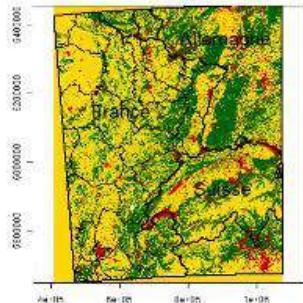


Habitats du lynx - Carte originale

Carte obtenue avec le paysage n'ayant subi aucune modification.

[Sauvegarder la carte](#)

Vous allez télécharger la carte originale des habitats du lynx au format Image (png).

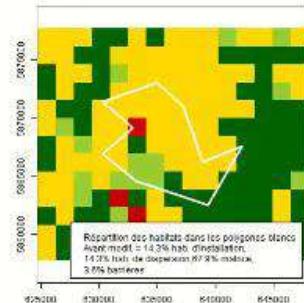


Habitats du lynx - Carte originale zoomée

Carte obtenue avec le paysage n'ayant subi aucune modification.

[Sauvegarder la carte](#)

Vous allez télécharger la partie zoomée (telle que visible) de la carte originale des habitats du lynx au format Image (.png).

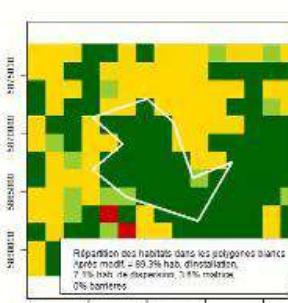


Nouveaux habitats du lynx - Carte modifiée zoomée

Carte obtenue en incluant les modifications faites sur le paysage visible dans l'onglet 'Visualiser le paysage modifié'.

[Sauvegarder la carte](#)

Vous allez télécharger la partie zoomée (telle que visible) de la nouvelle carte des habitats modifiés du lynx au format Image (.png).

 Habitats d'installation Habitats de dispersion Matrice Barrières

Dans le cas d'une modification ou suppression de zones d'habitation humaine, il faudra générer une nouvelle carte du risque de collisions, même sans modification du réseau routier. Les zones d'habitation humaines sont incluses dans le modèle de collision, leurs modifications va donc faire varier les probabilités de collision de manière indirecte. A l'inverse, la modification d'un tronçon autoroutier (création, modification ou suppression) devra s'accompagner de la création d'une nouvelle carte d'habitat, même sans modication du couvert paysager. La présence d'autoroutes est incluse dans le modèle d'habitat, leurs modications va donc faire varier la qualité d'habitat pour le Lynx.

➤ Modifier les populations :

Le dernier onglet sur lequel l'utilisateur peut ajouter des aménagements à son scénario se présente avec trois sous-onglet (similaires à ceux des deux autres onglets de travail).

Les points théorique affichés sur la carte de « Modifier les populations » correspondent à la localisation théorique des Lynx qui ont été créés en fonction d'un nombre par population et placés aléatoirement dans les zones de présence permanente de l'espèce (localisation probable).

Différentes couleurs sont utilisées pour les populations simulées :

- La population du Jura

- La population des Vosges-Palatinat

- La population des Alpes

- La population de la Forêt noire

L'utilisateur peut ajouter un individu dans une population (en pouvant renseigner le sexe et l'âge) ou retirer un individu en le sélectionnant sur la carte. Si l'utilisateur souhaite déplacer un individu, il devra en supprimer un d'une localisation pour en recréer un autre dans la zone souhaitée.

Toutes les modifications réalisées par l'utilisateur sont visibles dans le sous-onglet « Visualiser les populations modifiées » (comme pour les autres onglets de travail). Contrairement au deux autres onglets de travail, la composante « Population » ne présente pas de modèle à executer, il s'agit juste d'une modification directe de la carte et non d'une ré-estimation des populations.



• Onglet de simulation

Cet onglet « Tester le scénario créé », correspond au lieu de lancement du scénario créé par l'utilisateur à travers les différentes onglets précédents. L'utilisateur peut modifier seulement un, deux ou la totalité des composants du modèle via les onglets de travail en fonction de son projet.

Dans ce onglet l'utilisateur va trouver une carte restituant l'intégralité des modifications effectuées au niveau des réseaux routiers, du couvert paysager et des populations de Lynx.

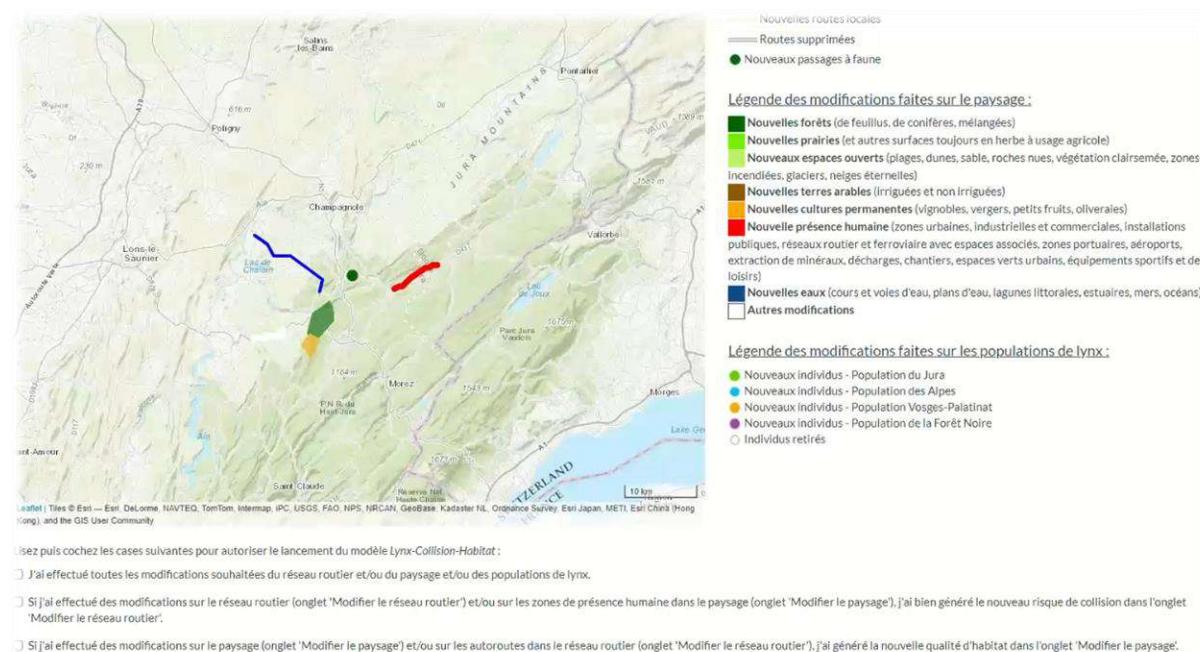
L'utilisateur doit pour terminer et valider son scénario, cocher les trois conditions affichées sous la carte :

« J'ai effectué toutes les modifications souhaitées du réseau routier et/ou du paysage et/ou des populations de Lynx »

« Si j'ai effectué des modifications sur le réseau routier et/ou sur les zones de présence humaine, j'ai bien généré le nouveau risque de collision dans l'onglet « Modifier le réseau routier »

« Si j'ai effectué des modifications sur le paysage (onglet « Modifier le paysage ») et/ou sur les autoroutes dans le réseau routier (onglet « Modifier le réseau routier »), j'ai généré la nouvelle qualité d'habitat dans l'onglet « modifier le paysage »

Une fois ces conditions cochées, l'utilisateur peut alors lancer le modèle individu centré qui va simuler le devenir des populations de Lynx sur 50 ans en prenant en compte le nouveau paysage modifié (c'est-à-dire la carte des probabilités de collisions modifiées, celle des habitats modifiés et les populations initiales théoriques modifiées). Lorsqu'un composant du modèle n'est pas modifié, la carte d'origine est alors utilisée.



• Onglet descriptif

Le dernier onglet de l'interface, « Descriptif du modèle Lynx collision habitat », décrit tous les modèles (modèle de collision entre Lynx et véhicules, modèle d'habitat du Lynx, et différents élément



du modèle individu-centré et la création des populations théoriques initiales. On trouve également une liste exhaustive des paramètres utilisés dans les modèles (ex : taux de mortalités, probabilités de reproduction, etc.) et enfin, une liste de références.

● Résultats produits par l'outil

A la suite de toutes ces manipulations et lorsque l'utilisateur lance son scénario dans l'onglet « Tester le scénario créé », 200 réplications de simulations des populations de Lynx sur 50 ans vont être effectuées. Une fois les simulations terminées, un document de résultats est envoyé à l'utilisateur avec l'évolution positive, négative ou nulle des quatre indices de viabilité du Lynx.

Ces changements de valeur entre le paysage d'origine et celui aménagé par l'utilisateur sont calculés à quatre échelles différentes :

- A l'échelle de la population concernée (par exemple, la population des Alpes, la population du Jura),
- A l'échelle de la zone aménagée (qui englobe seulement les aménagements de l'utilisateur)
- A l'échelle de 100 km² centrée sur les aménagements (qui représente un territoire de Lynx)
- A une échelle de 900 km², centrée également sur la zone d'aménagements.

Ces indices de viabilités et les échelles seront amenés à évoluer si les utilisateurs de l'outil ne les trouvent pas adaptés à leurs besoins.

Voici un exemple d'un indice de viabilité, il s'agit du nombre de passages de Lynx en dispersion à une échelle donnée (ici l'échelle de la population concernée) :

La carte représente l'aire d'étude maximale de l'outil, qui englobe donc une partie de la France, de la Suisse et de l'Allemagne.

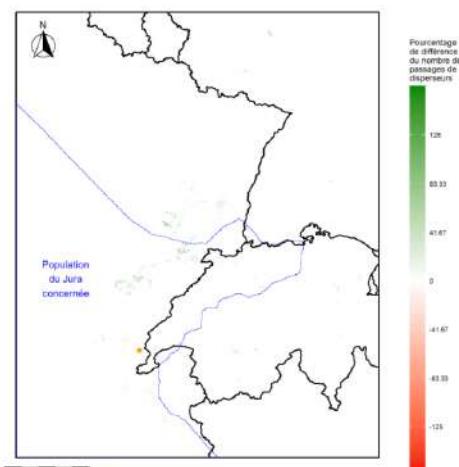
Nous pouvons voir que l'aménagement (polygone orange sur la carte) concerne la population du Jura du fait de sa localisation. Chaque cellule de la carte est colorée selon le gradient de couleur qui représente le pourcentage de différence entre le nombre de passages de disperseur sur une cellule dans le paysage modifié, comparé au nombre de passages de disperseur sur une cellule dans le paysage d'origine.

Si la cellule est **verte**, il y a eu davantage de Lynx transitant sur cette cellule dans le paysage modifié avec les aménagements. Si la cellule est **rouge**, il y a eu moins de passage d'individus. Si la cellule est **blanche**, cela signifie que la différence entre les 2 simulations n'est pas significative.

Passage de lynx en dispersion

Difference entre la situation initiale et votre scénario d'aménagement pour le nombre de passages de disperseurs à l'horizon de 50 ans.

Périmètre d'action maximale de l'outil ERC-Lynx



Polygone orange = Zone modifiée par le scénario d'aménagement testé

Il n'y a pas de différence significative du nombre de passages de disperseurs sur les 50 années simulées, dans la population de lynx concernée (Jura), entre la situation initiale (inhalante à la conception de l'outil ERC-Lynx, 640471 passages de disperseurs en moyenne sur les 200 réplications) et votre scénario d'aménagement (642834 passages de disperseurs en moyenne sur les 200 réplications).

Pas d'effet sur la dispersion à l'échelle des populations de lynx.

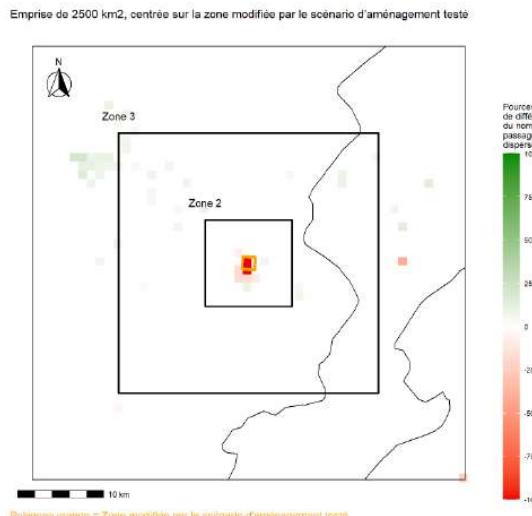


Un résumé des valeurs à l'échelle concernée est visible sous la carte. Par exemple, ici il n'y a pas de différence significative à l'échelle de la population.

Pour un même indice, une autre carte est disponible aux trois autres échelles, zoomées sur l'aménagement.

- **Une zone orange centrale**, qui représente la zone aménagée.
- **Une zone 2**, de 100 km² centrée sur la zone aménagée
- **Une zone 3**, de 900 km² centrée sur la zone aménagée.

Un résumé des valeurs de l'indice pour chaque échelle accompagne cette carte.



Pour cet exemple ci, les cellules dans la zone aménagée sont rouges. De ce fait, le résumé de cette échelle stipule :

« Il y a 100 % de passage de disperseurs en moins sur les 50 années simulées, dans la zone aménagée (zone orange) de 2 km², entre la situation initiale (39 passages de disperseurs en moyenne sur les 200 réplications) et le scénario d'aménagement (0 passages de disperseurs en moyenne sur les 200 réplications). **Il y a un effet négatif des aménagements testés sur le Lynx, sur cet indice, à cette échelle.** »

Il n'y a pas d'effet significatif pour les deux autres zones. Par exemple, au niveau de la zone 2, il y a eu 3157 passages de disperseurs en moyenne simulés sur les 200 réplications dans le paysage d'origine et 3174 passages de disperseurs en moyenne simulés sur les 200 réplications dans le paysage modifié. **La différence n'est pas significative.**

Enfin, un texte récapitulatif conclue sur le résultat pour chaque indice. Pour cet exemple et cet indice, nous avons un effet nul à 3 échelles spatiales et un effet négatif à une échelle spatiale (l'échelle de la zone aménagée).

Référence de l'intervention :

BAUDUIN S. (2021) Présentation de l'outil ERC-Lynx In: Les actes de la journée de restitution du projet ERC-Lynx : Eviter, réduire et compenser la mortalité du Lynx boréal par collision avec les véhicules de transport. Webinaire du 4 juin 2021, Projet ITTECOP 2018-2020, CEFE/Cerema/CROC/OFB. p 27-40



- Application de l’Outil ERC-Lynx : Exemple de scénarios fictifs

Intervention Sarah BAUDUIN (OFB)

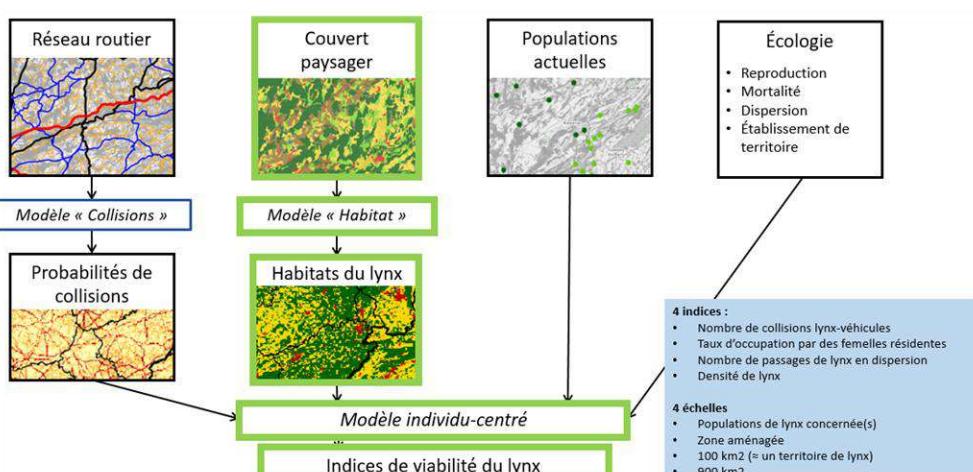
Suite à la présentation de l'outil ERC-Lynx, nous allons simuler pour exemples deux scénarios **fictifs** d'aménagements du territoire dans des zones de présence de Lynx, qui ont été testés avec l'outil. Les deux scénarios concernent le massif du Jura :

- Le premier représente **la création d'une zone d'activité commerciale (ZAC)** dans le Parc Naturel Régional (PNR) du Haut-Jura, vers la commune de Lamoura, où se situe le cœur de présence de la population de Lynx dans ce massif.
 - Le deuxième représente **la création d'un passage à faune** sur la RN57 vers la commune de Jougne où plusieurs collisions de Lynx ont été observées ces dernières années.

- Scénario n°1 : Crédit d'une ZAC dans le PNR Haut-Jura

La zone de création de la ZAC possède un rayon d'environ 2km².

Pour représenter la création d'une ZAC, l'utilisateur doit, via l'interface, modifier le couvert paysager, et convertir le paysage dans la zone souhaitée en **zone urbaine**. L'outil va ensuite utiliser le modèle d'habitat pour ré-estimer une **nouvelle carte des habitats prenant en compte celle nouvelle zone urbaine**, qui va être utilisée dans le modèle individu-centré. Ce dernier va ensuite simuler le devenir des populations de Lynx dans ce nouveau paysage et quatre nouvelles valeurs pour les indices de viabilité du Lynx vont être calculées.





Pour rappel, **la carte d'habitat** est utilisée dans le modèle individu-centré au niveau de la simulation de la dispersion des individus et de l'établissement des territoires pour les femelles de manière directe et pour les mâles de manière indirecte (établissement de leurs territoires en fonction de ceux des femelles).

Concrètement, avec l'outil, les différentes étapes pour tester l'impact sur le Lynx de ce scénario sont :

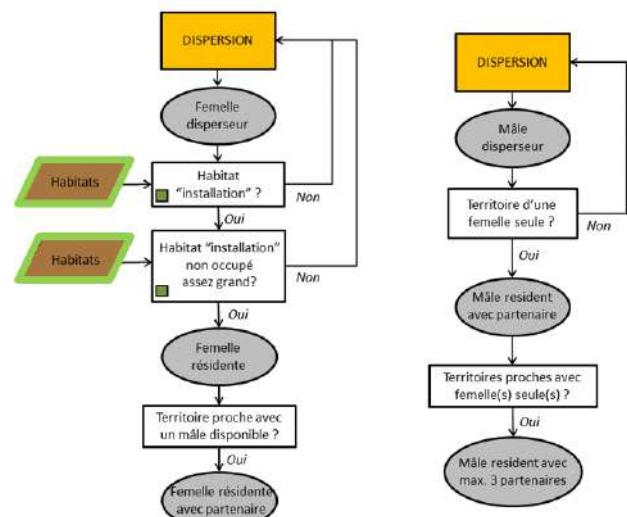
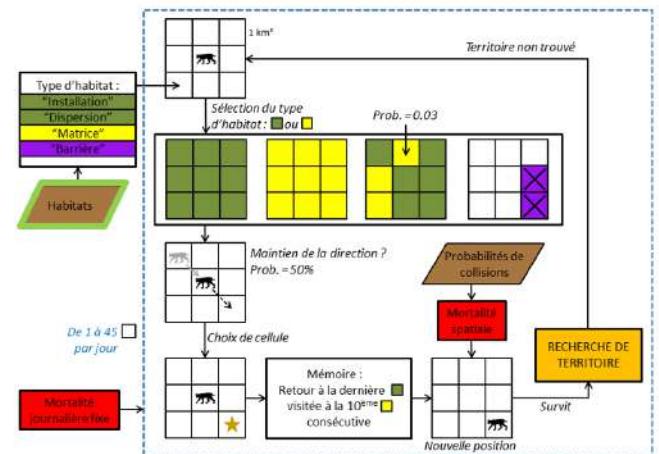
- La transformation par l'utilisateur du couvert paysager de la zone de la ZAC en « présence humaine ». Cette dernière se fera dans l'onglet « **modifier le paysage** ».
- La création d'habitats de barrières à la place de la ZAC via le modèle d'habitats.
- La modification de la dispersion et de la recherche de territoire des individus simulés dans la modèle individu-centré, par rapport à quand simulés dans le paysage d'origine, dû à cette nouvelle zone barrière qu'ils ne peuvent plus emprunter.
- Le calcul de nouveaux indices de viabilités une fois la simulation lancé dans l'onglet « **Tester le scénario créé** », qui vont être comparés à ceux calculés avec le paysage d'origine. Les résultats obtenus seront ainsi délivrés à l'utilisateur.
- Enfin, l'utilisateur va regarder les effets positifs, nuls ou négatifs sur chaque indice à Les manipulations que l'utilisateur devra réaliser pour générer son scénario se feront pour cet exemple dans l'onglet « **Modifier le paysage** ».

Le document résultat produit, une fois les 200 simulations finies, se présente sous quatre grandes parties :

- **Explication des résultats**

Cette première partie détaille la méthode de calcul des quatre indices de viabilité aux différentes échelles, et explique les cartes présentées dans le document de résultats. Enfin, elle détaille les résumés de chaque carte ainsi que le calcul de la significativité des résultats.

chaque échelle pour ensuite conclure sur le scénario testé.





- **Votre scénario d'aménagement**

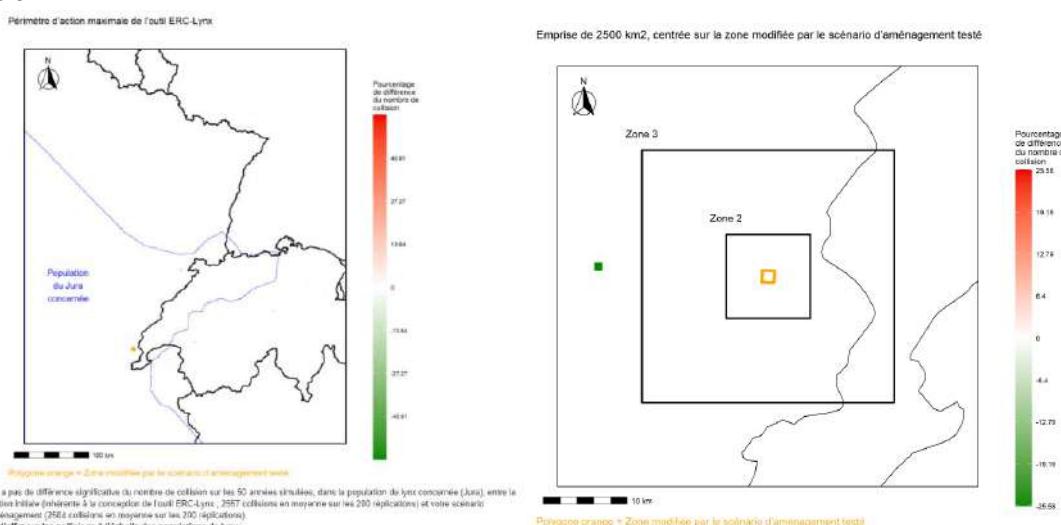
Cette partie présente la carte avec tous les aménagements testés. Cette carte est la même carte que celle visible dans l'onglet « Tester le scénario créer » (figure 04).

- **Résultats de votre scénario d'aménagement**

Cette partie comporte quatre sous-paragraphes, qui présentent les résultats du scénario pour chacun des quatre indices de viabilité.

➤ **Indice de viabilité n°1 : le nombre de collisions Lynx/véhicules**

Sur la carte présentée, il ne semble pas y avoir de changements majeurs à l'échelle de la population pour ce scénario, il n'y a pas suffisamment de cellules de couleurs vertes et/ou rouges pour traduire un changement significatif à cette échelle. Ceci est confirmé par le texte accompagnant la figure, qui indique qu'il n'y a pas d'effet significatif sur les collisions, de la mise en place de la ZAC pour cette échelle ci.



Pour les trois autres échelles, respectivement la zone aménagée correspondant à la ZAC (polygone orange), la zone 2 (100 km² centrée sur la zone aménagée), et la zone 3 (900 km² centrée sur la zone aménagée), nous pouvons constater (sur la carte et au niveau du texte l'accompagnant) qu'il n'y a **aucun impact significatif, positif ou négatif**, sur le nombre de collisions entre Lynx et véhicules qui découlerait de la mise en place de la ZAC.

La conclusion sur cet indice indique donc : « **Pour cet indice de viabilité, sur les 50 années simulées, nous observons un effet nul sur les populations de Lynx de votre scénario d'aménagement à quatre échelles spatiales.**

➤ **indice de viabilité n°2 : la probabilité d'occupation du territoire par des femelles résidentes.**

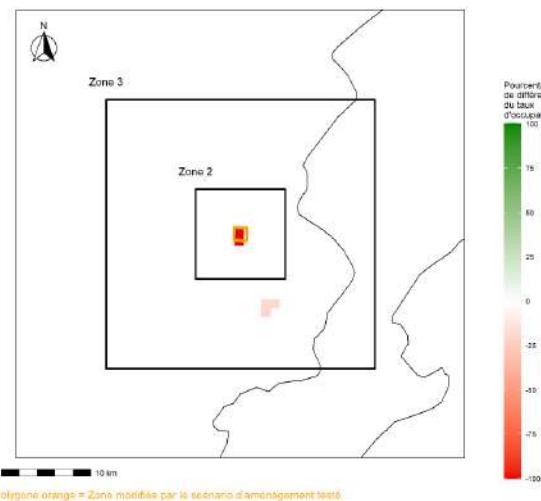
Comme pour l'indice précédent, nous obtenons des cartes de résultats à différentes échelles. Nous pouvons ainsi constater que la mise en place de la ZAC n'a pas d'impact à l'échelle de la population, mais qu'elle influe aux autres échelles.

Cet aménagement présente un effet **significatif négatif** au niveau de la zone aménagée et dans la zone 2, comme nous l'explique le texte accompagnant la seconde carte :



« Il y a une diminution de 82.5 points du taux d'occupation par des territoires femelles à l'horizon de 50 ans, dans la zone aménagée (zone orange) de 2km², entre la situation initiales (inhérente à la conception de l'outil ERC-Lynx ; 82.5% d'occupation de la zone par des territoires femelles en moyenne sur les 200 réPLICATIONS) et votre scénario d'aménagement (0% d'occupation de la zone par des territoires femelles en moyenne sur les 200 réPLICATIONS). **Effet négatif sur l'occupation du territoire à l'échelle de la zone aménagée.** »

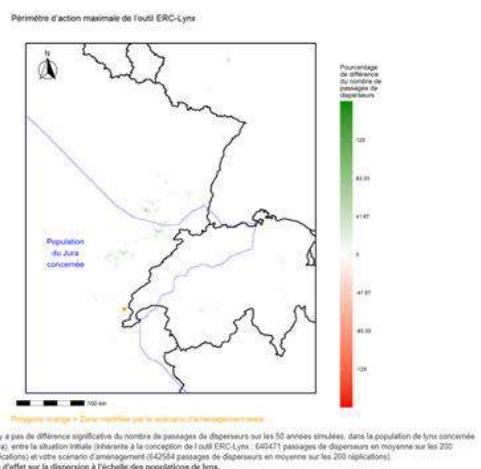
Il y a une diminution de 2.2 points du taux d'occupation par des territoires femelles à l'horizon de 50 ans, dans la zone 2 de 100 km² centrée sur la zone aménagée entre la situation initiales (inhérente à la conception de l'outil ERC-Lynx ; 65.7% d'occupation de la zone par des territoires femelles en moyenne sur les 200 réPLICATIONS) et votre scénario d'aménagement (63.5% d'occupation de la zone par des territoires femelles en moyenne sur les 200 réPLICATIONS). **Effet négatif sur l'occupation du territoire à l'échelle de la zone aménagée.** »

Empreinte de 2500 km², centrée sur la zone modifiée par le scénario d'aménagement testé

➤ Indice de viabilité n°3 : le nombre de passages de Lynx en dispersion.

Nous constatons quelques cellules en vert sur la carte ce qui pourrait traduire un impact au Nord de la zone. Cependant, il s'agit de la stochasticité du modèle car le texte d'accompagnement ne traduit aucun effet significatif sur le nombre de passages de Lynx en dispersion à l'échelle de la population du Jura

« Il n'y a pas d'effet significatif du nombre de passages de disperseurs sur les 50 années simulées, dans les populations de Lynx concernée (Jura), entre la situation initiale inhérente à la conception de l'outil ERC-Lynx : 640471 passages de disperseurs de moyenne sur les 200 réPLICATIONS) et votre scénario d'aménagement (642584 passages de disperseurs sur les 200 réPLICATIONS). **Pas d'effet sur la dispersion à l'échelle de populations de Lynx.** »

Passage de lynx en dispersion
Différence entre la situation initiale et votre scénario d'aménagement pour le nombre de passages de disperseurs à l'horizon de 50 ans



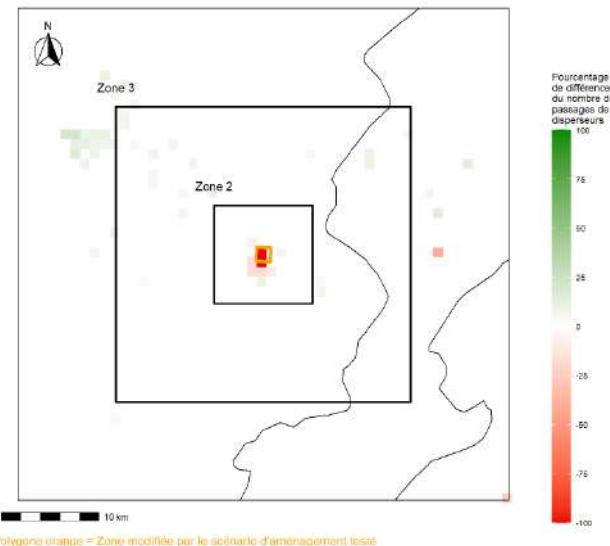
Concernant les autres échelles, nous pouvons constater un **impact négatif significatif** seulement à l'échelle de la zone aménagée (polygone orange)

Dans le paysage d'origine, 39 passages de Lynx en dispersion étaient comptabilisé en moyenne sur les 200 réplications, dans la zone des 2 km² aménagés, cumulés sur 50 ans.

Dans le nouveau paysage, sur cette zone, 0 passage de Lynx sont comptabilisés. Il y a donc un **effet négatif significatif**.

A l'inverse, contrairement à l'indice d'occupation des femelles résidentes, il n'y a pas d'impact significatif sur la zone 2 (zone des 100 km²). Nous observons une évolution de 3157 passages de Lynx, en moyenne sur les 200 réplications, cumulés sur 50 ans dans cette zone de 100 km² dans la paysage d'origine, à 3174 passages de Lynx en moyenne dans le paysage modifié. La différence **n'est pas significative pour l'échelle de la zone 2, ni d'ailleurs pour celle de la zone 3.**

Emprise de 2500 km², centrée sur la zone modifiée par le scénario d'aménagement testé



Ainsi, la conclusion de cet indice se présente sous cette forme :

« Pour cet indice de viabilité, sur les 50 années simulées, nous observons un **effet nul** sur les populations de Lynx de votre scénario d'aménagement à trois échelle spatiales. Pour cet indice de viabilité, sur les 50 années simulées, nous observons un **effet négatif** sur les populations de Lynx de votre scénario d'aménagement à une échelle spatiale. »

➤ Indice de viabilité n°4 : la densité de Lynx.

Concernant cet indice, le document nous énonce que le scénario présenté ici ne montre aucun effet sur cet indice ni à l'échelle de la population concernée ni aux 3 autres échelles.

Il est à noter qu'étant donné que la densité est calculée à une échelle de 100 km², la valeur dans la zone aménagée est la même que la valeur dans la zone de 100 km² et la différence n'est pas significative.

En résumé, nous avons donc un effet nul aux 4 échelles spatiales étudiées pour cet indice de densité de Lynx.

• Conclusion sur votre scénario d'aménagement

La dernière partie du document fournit à l'utilisateur résume l'intégralité des résultats. Pour cet exemple de scénario :

« Sur les quatre indices de viabilité calculés avec votre scénario d'aménagement, deux montrent un effet négatif, à au moins une des quatre échelles spatiales détaillées ci-dessus, sur les populations de Lynx à l'horizon de 50 ans. Les indices qui montrent un effet négatif sur les populations de Lynx sont :



- **L'occupation du territoire** par des femelles résidentes à l'échelle de la zone aménagée et à l'échelle d'une surface de 100 km² équivalente à un domaine vital de Lynx et centrée sur la zone aménagée.
- **Le passage de Lynx** en dispersion à l'échelle de la zone aménagée. »

Lorsque qu'un scénario testé **entraîne un ou plusieurs effets négatifs** sur les indices de viabilité, le document de résultats pour l'utilisateur se conclue par le message suivant :

« Au regard de ces résultats, nous vous invitons à tester d'autres scénarios pour annuler tout effet négatif de votre scénario d'aménagement sur les populations de Lynx (Éviter), trouver d'autres alternatives pour atténuer l'effet négatif sur les populations (Réduire) ou ajouter d'autres aménagements pour compenser l'effet négatif de ceux testés dans votre scénario (Compenser). »

- **Bilan du scénario : Que faut-il penser et retenir sur ce scénario de création d'une ZAC dans le PNR Haut-Jura ?**

Comme vu précédemment, il y a un **impact négatif significatif** sur l'établissement des femelles et sur le passage des disperseurs, (diminution significative de la valeur de ces 2 indices).

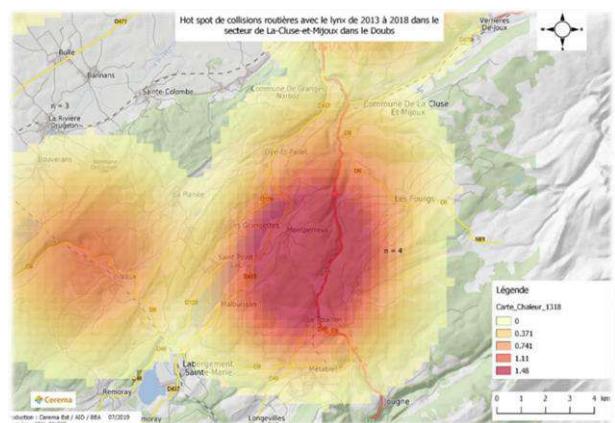
Cependant, cet impact est assez local, à l'échelle de la zone aménagée surtout, et sans dépasser au plus large l'échelle des 100 km². De ce fait, l'impact de ce scénario d'aménagement reste assez minimum sur le Lynx dans le Jura et en France.

Malgré cela, il y a plusieurs points de vigilance à garde en tête pour l'interprétation de ces résultats :

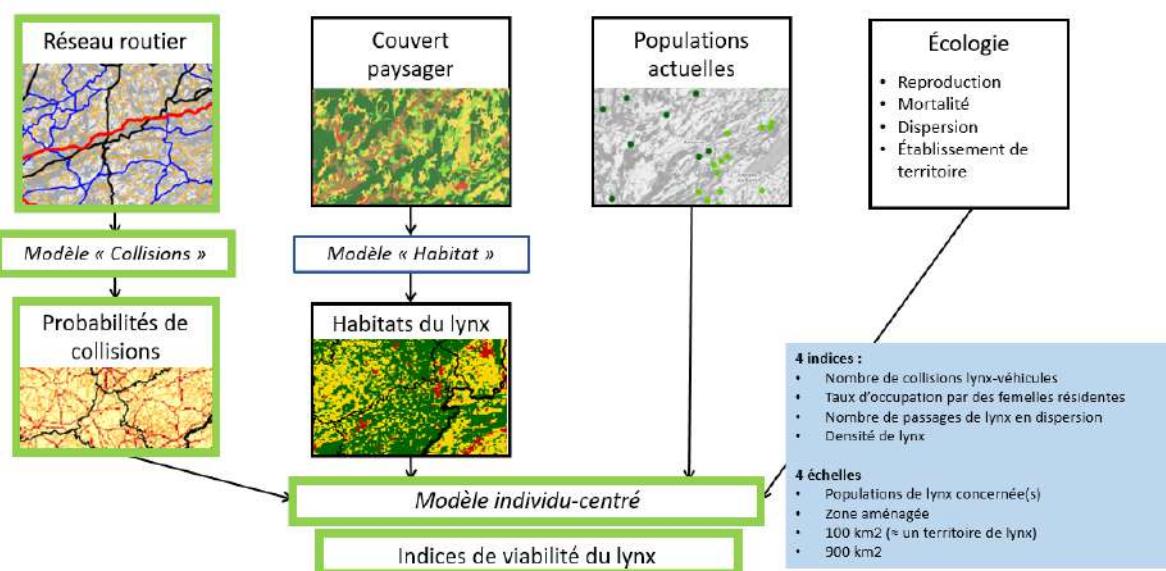
- D'abord l'outil ne **modifie pas automatiquement d'autres éléments du paysage** suite à l'aménagement. Par exemple, il n'y a pas d'ajustement automatique du trafic routier et du risque de collisions. Si une augmentation du trafic est prévue avec la mise en place de la ZAC, cela doit être créé comme un aménagement dans l'outil par l'utilisateur pour que cela modifie le risque de collisions et que cet élément soit pris en compte.
 - De plus, le Lynx est une espèce **mobile à vaste domaine vital**. La mise « sous cloche » des 2 km² qui ne sont plus disponibles pour le Lynx ne va pas impacter la population sur une grande échelle. Cette zone rendue indisponible par l'installation de la ZAC va pouvoir être contourner par les individus.
 - Le Lynx n'est aussi pas le seul représentant de la biodiversité, et d'autres espèces qui vivent localement à l'endroit de la mise en place de la ZAC peuvent être plus impactées que le Lynx.
 - Finalement, ce scénario correspond au test d'un aménagement local. L'aménageur (ou utilisateur de l'outil) doit prendre en compte et si possible intégrer dans son scénario tous les autres aménagements en cours ou en projet afin de prendre en compte l'effet cumulé de plusieurs aménagements. Par exemple, une suppression de 2 km² de forêt n'impacterait pas fortement le Lynx, alors que plusieurs petits aménagements indépendants (développement du réseau routier, etc.) pourraient entraîner des conséquences beaucoup plus importantes sur le Lynx du fait de leurs effets cumulés.
- **Scénario n°2 : Création d'un passage à faune au niveau de la RN57 (Jougne)**



Ce 2^{ème} exemple de scénario test la création d'un passage à faune sur la RN57 à proximité de la commune de Jougne (25). Cette localisation avait notamment été identifiée comme un point chaud ou « hot spot » de collisions pour le Lynx.



Dans ce scénario d'aménagement, la modification du paysage a lieu sur le réseau routier. Le modèle de collision va de ce fait estimer une nouvelle **carte de probabilités de collision**, en prenant en compte les aménagements (ici le passage à faune) créés par l'utilisateur. La nouvelle carte de probabilité de collisions va être incluse dans le modèle individu-centré, qui va simuler le devenir des populations de Lynx. Les 4 nouveaux indices de viabilité seront ensuite calculés à chacune des quatre échelles.



Pour rappel, la **carte de probabilité de collisions** influence la mortalité spatiale des résidents et des disperseurs.

Ici, les différentes étapes pour tester l'impact de la mise en place d'un passage à faune sur le Lynx avec l'outil sont:

- La création d'un passage à faune sur la RN57 par l'utilisateur.
- La suppression du risque de collisions à l'endroit de la création du passage à faune par le modèle de collision, sur une longueur de 1km qui représente le passage à faune ainsi que ses barrières latérales. Le risque de collision sur ce tronçon de route de 1km est nul.
- La modification de la mortalité spatiale des individus simulés passant sur ce tronçon de route, par rapport à quand simulés dans le paysage d'origine, dans le modèle individu-centré : les Lynx ne



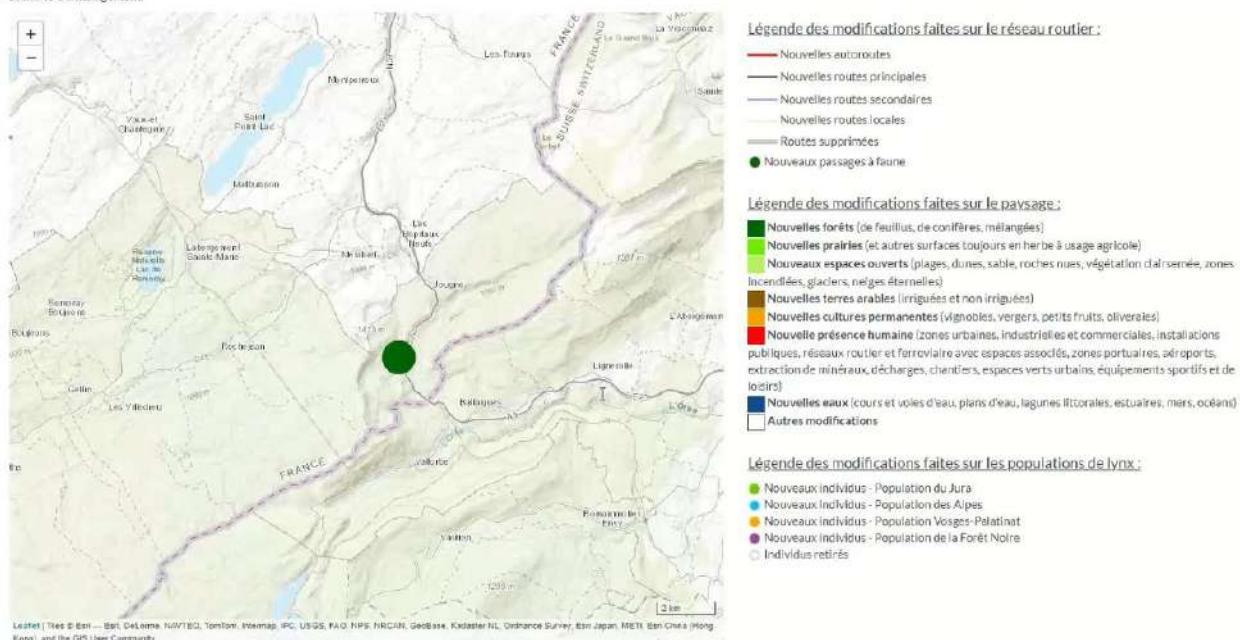
mourront plus lors de la traversée de ce tronçon. De nouveaux indices de viabilités vont être calculés à la fin de la simulation, et vont être comparés à ceux calculés sur le paysage d'origine. Les résultats seront enfin retournés à l'utilisateur sous la forme du document de résultat final.

- Enfin, l'utilisateur sera renseigné sur les effets positifs, nuls ou négatifs de chaque indice et à chaque échelle, et pourra conclure sur le scénario testé.

L'utilisateur va générer le **nouveau risque de collision** entre Lynx et véhicules puis lancer le modèle individu-centré dans l'onglet « Tester le scénario créé ».

Scénario testé

Voici une synthèse des modifications qui vont être incluses dans le modèle Lynx-Collision-Habitat pour tester l'effet de votre scénario d'aménagement sur la viabilité des populations de lynx. Merci de bien vérifier que cela est conforme à votre scénario d'aménagement.

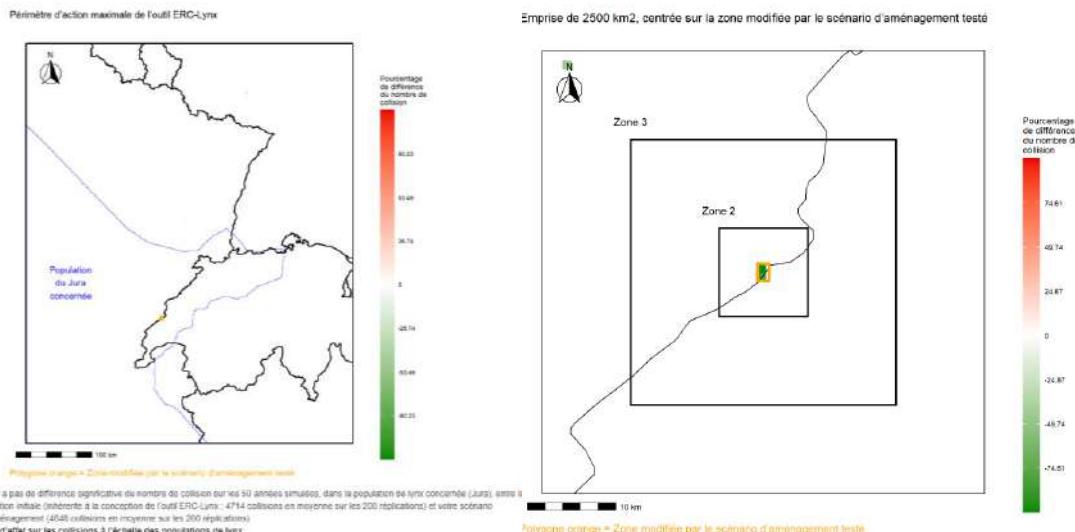


L'utilisateur obtient un document de résultat pour ce scénario, qui se présente en quatre grandes parties, de la même manière que celui du scénario n°1.

- **Résultats de votre scénario d'aménagement**

- **Indice de viabilité n°1 : le nombre de collisions Lynx/véhicules**

De même que pour le scénario n°1, les résultats obtenus à l'échelle de la population concernent la population du Jura, du fait de la localisation de l'aménagement testé dans la zone du Jura. A l'échelle de la population, il n'y a pas d'effet significatif de la mise en place du passage à faune.



Cependant, il y a un effet significatif de la présence du passage à faune à l'échelle de la zone aménagée (zone orange) ainsi qu'à l'échelle de la zone 2 (100 km^2).

- Au niveau de la zone aménagée, il y avait dans le paysage d'origine, 3 collisions en moyennes simulées sur 50 ans (200 simulations). Après modification, il n'y a plus aucune collision simulée.

L'aménagement a donc **un effet positif significatif** sur le nombre de collisions Lynx/véhicules à l'endroit de la mise en place du passage à faune.

- Au niveau de la zone 2, il y avait dans la paysage d'origine, 27 collisions en moyenne simulées sur 50 ans (200 simulations). Après modification, le chiffre est descendu à 25 collisions en moyenne. Malgré cette faible baisse, le résultat est significatif.

- En revanche, il n'y a pas d'impact significatif du passage à faune sur le nombre de collisions à l'échelle de la zone 3 (900 km^2).

Pour conclure sur cet indice, ce scénario induit un **effet positif significatif** à 2 échelles spatiales et **un effet nul** aux 2 autres échelles spatiales.

➤ **Indice de viabilité n°2 : la probabilité d'occupation du territoire par des femelles résidentes**

Pour ce scénario n°2, il n'y a aucun effet significatif pour cet indice à l'échelle de la population comme aux autres échelles testées.

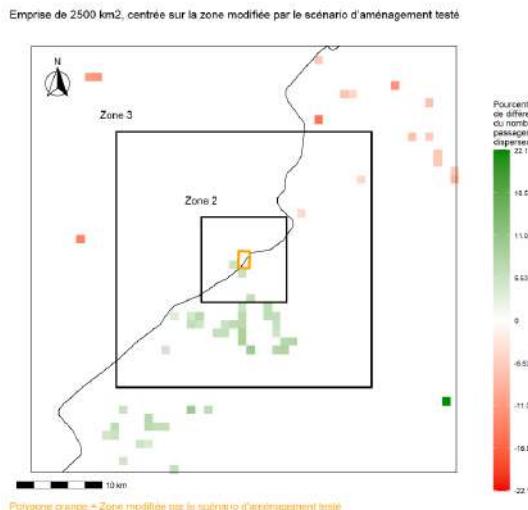
➤ **Indice n°3 : le nombre de passages de Lynx en dispersion.**

De même que pour la probabilité d'occupation du territoire par des femelles résidentes, il n'y a aucun effet significatif à aucune échelle pour cet indice.



Il est à noter ici que les différentes cellules de couleurs visibles sur la carte zoomée sur l'aménagement ne découlent pas d'une réelle différence (et donc d'un impact significatif de l'aménagement), mais plutôt de la stochasticité du modèle. Cette précision est faite dans le texte accompagnant la carte :

« Pour cet indice de viabilité, sur les 50 années simulées, nous observons un effet nul sur les populations de Lynx de votre scénario d'aménagement à quatre échelles spatiales ».



➤ **Indice de viabilité n°4 : la densité de Lynx.**

Concernant cet indice, le document nous énonce que le scénario présenté ici ne montre pas d'effet ni à l'échelle de la population concernée ni aux 3 autres échelles.

• **Conclusion sur votre scénario d'aménagement**

Le document de résultat transmis à l'utilisateur ce termine donc pour ce scénario de création de passage à faune sur le paragraphe suivant :

« Avec votre scénario d'aménagement, les quatre indices de viabilité calculés à l'horizon de 50 ans indiquent un effet positif ou nul sur les populations de Lynx à chacune des quatre échelles spatiales étudiées. »

Du fait de l'absence d'impact négatif pour les indice de viabilité dans ce scénario, le second texte qui préconise de tester d'autres aménagements afin d'éviter, réduire, ou compenser les impacts négatifs n'apparaît pas ici, à l'inverse du scénario précédent.

• **Bilan du scénario :_Que faut-il penser et retenir sur ce scénario de la création d'un passage à faune sur la RN57 ?**

Pour conclure sur ce scénario de création de passage à faune sur la RN57, nous obtenons :

- Un impact **positif** pour le Lynx sur le nombre de collisions (réduction significative)
- Un impact **local**, à l'échelle de l'aménagement et à une échelle de 100 km²
- Un impact **minime** sur le Lynx dans le Jura (donc pour la population concernée) ainsi qu'en France.

De la même manière que pour le 1^{er} scénario testé, ces conclusions doivent quand même être relativisées :



- Pour l'instant, au niveau du modèle individu-centré, le réseau routier **impacte les Lynx simulés seulement au niveau de la mortalité**. C'est-à-dire que la présence des routes agit seulement sur la mortalité des individus mais pas sur leurs déplacements. Les routes n'ont pas d'effet barrières ou de résistance face aux mouvements des individus. Ils les traversent sans les prendre en compte et survivent ou meurent à chaque traversée. La manière dont la dispersion du Lynx est simulée peut-être améliorée pour que les routes soient prises en compte dans le choix du mouvement de manière à représenter au mieux la réalité sur le terrain.
- Ensuite, de la même manière que pour le 1^{er} scénario, le Lynx est une espèce **mobile à vaste domaine vital**. Du fait que les routes ne soient pas incluses dans la simulation du mouvement de dispersion, le Lynx n'a pas conscience de la présence du passage à faune dans le paysage. Cela implique seulement une suppression du risque de collisions à son emplacement qui agira quand un Lynx, par chance, passera par là car les Lynx simulés ne sont pas encouragés à traverser la route au niveau de ce dispositif.
- De la même manière que pour le 1^{er} scénario, le Lynx n'est pas le seul représentant de la biodiversité. La mise en place d'un passage à faune (aménagement très couteux) doit être bénéfique à plusieurs autres espèces et la seule conclusion de son impact sur le Lynx ne peut résumer de son impact bénéfique ou non sur la biodiversité.
- Enfin, cette création de passage à faune est un aménagement local et l'aménageur et/ou l'utilisateur de l'outil doit prendre en compte toutes les modifications en cours ou à venir pour globaliser les effets cumulés.

● Conclusion sur l'outil ERC-Lynx

Cet outil ERC-Lynx ne donne pas de réponse clé en main, c'est un outil **d'aide à la décision**, qui doit être complémentaire à d'autres éléments dans l'application de la séquence ERC.

L'outil peut également être utilisé pour comparer un scénario d'aménagement avec d'autres options similaires, comme par exemple, dans le contexte du 1^{er} exemple, une ZAC dans une autre zone, d'une superficie ou configuration différentes, avec d'autres mesures complémentaires, etc. Cela permet de voir les différences d'impacts sur les populations de Lynx à travers chacun des 4 indices de viabilité et déterminer si des aménagements peuvent être modifiés pour minimiser au maximum les impacts négatifs, ou maximiser au mieux les impacts positifs, sur les populations de Lynx.

Référence de l'intervention :

BAUDUIN S. (2021) Application de l'Outil ERC-Lynx : Exemple de scénarios fictifs *In: Les actes de la journée de restitution du projet ERC-Lynx : Eviter, réduire et compenser la mortalité du Lynx boréal par collision avec les véhicules de transport. Webinaire du 4 juin 2021, Projet ITTECOP 2018-2020, CEFE/Cerema/CROC/OFB. p 41-51*



● Questions – Réponses de la journée de restitution

• Question n°1 par Hervé BELLIMAZ (France Nature Environnement Bourgogne-Franche-Comté (FNE BFC)) :

« Ne peut-on pas envisager pour un même budget d'associer dans les zones à risques, un panneau de signalisation « Lynx » et de limitation de vitesse ?

Christine SAINT-ANDRIEUX (Office Français de la Biodiversité) :

C'est une question très compliquée car cela nécessiterait beaucoup de réduction de vitesse sur la totalité du réseau routier français. Même lorsque l'on aborde les problèmes de collisions routières avec les ongulés et les risques d'accidents mortels pour les populations humaines, il est très difficile de réduire les vitesses de circulation.

Virginie BILLON (CEREMA Dter Centre Est) :

Le département de l'Isère a mis en place des détecteurs de faune couplés à des panneaux d'alerte lumineuse qui informent l'usager qu'il y a un animal sauvage à proximité de la route. Certains sont accompagnés d'une limitation de vitesse à 70km/h temporaire par panneaux lumineux.

Julien BARLET (Parc naturel régional du Haut-Jura) :

Comme discuté dans le cadre du PNA, le PNRHJ s'est porté candidat comme territoire expérimental pour travailler sur les collisions et engager une réflexion en 2022 avec l'ensemble des acteurs concernés. Ce travail devra être mené en lien étroit avec les gestionnaires d'infrastructures compétents et aura vocation, notamment, de voir ce qu'il est possible de mettre en œuvre rapidement, selon les outils disponibles et qui ont fait leur preuve ailleurs.

Alain MORAND (CEREMA Dter-Est) :

L'exemple des détecteurs de mouvement en Isère est effectivement un bon exemple à approfondir pour signaler la présence de la grande faune en déplacement en direction de la chaussée avec comme objectif d'alerter les automobilistes. Le coût est encore relativement élevé (d'après Anne Sophie Croyal dans son retour d'expérience au conseil départemental de l'Isère), mais les chercheurs en ingénierie innovante travaillent à le réduire (il existe un tel système innovant en Allemagne, « Animot » en cours de développement et/ou de commercialisation).

Les travaux d'un projet européen LIFE en Espagne ont démontré qu'une limitation de 20 à 30 km/h, réduit la mortalité dans certains secteurs du Lynx ibérique. L'associer à des panneaux « visuel Lynx » est une question importante à étudier, notamment via des discussions comme celles que nous avons eu dans le cadre d'ERC-Lynx avec les Conseils Départementaux respectivement du Jura (Philippe ALBERT) et du Doubs (Christian BULLE), avec lesquels nous avons déjà collaboré.

Cependant, la mise en place de limitation de vitesse en France est une question relativement difficile à mettre en place (voir l'expérience de la limitation à 80 km/h). Nous sommes aujourd'hui au démarrage de mesures correctrices qui pourront être expérimentées au lancement du PNA (des solutions plus ou moins chères seront donc à l'étude pour être mise à l'œuvre).

Dans le cadre de ce PNA, effectuer des expérimentations, qui restent encore à identifier, sur le territoire du PNRHJ serait également une démarche très intéressante qui permettrait d'évaluer ce qui est efficace ou ce qui l'est moins dans un contexte d'acteurs favorables à un tel projet.



Christine SAINT-ANDRIEUX (OFB) :

A noter que le dispositif mené en Isère est intéressant en zones ouvertes mais qu'il n'est cependant pas applicable en milieux plus fermés tels que la forêt, zone privilégiée de collision avec les grands ongulés et aussi le Lynx.

● **Question n°2 par Claudine BURTIN (DDT 67) :**

« Le modèle est-il utilisable en zone de colonisation par le Lynx, malgré la faible quantité de données collisions, comme par exemple dans le cadre de la recolonisation du Lynx dans le Bas-Rhin, suite au programme de réintroduction d'Allemagne » ?

Olivier GIMENEZ (CNRS) :

Il est tout à fait possible d'utiliser le modèle où les collisions sont peu nombreuses. Dans ce cas-là, des prédictions basées sur les caractéristiques des routes et la présence du Lynx sont faites pour estimer la valeur du risque de collision.

● **Question 3 par Jérôme BOMBOIS (Fédération départementale des chasseurs du Jura) :**

« Serait-il intéressant d'alimenter le modèle avec de nouvelles données de déplacement de Lynx ? »

Olivier GIMENEZ :

Tout à fait. De fait, nous utilisons les données GPS collectées dans le cadre du Life Palatinat pour valider les prédictions du modèle que présente Sarah BAUDUIN. L'utilisation de telles données est prévue également pour raffiner la description de la dispersion du Lynx, en particulier en lien avec le comportement de l'espèce par rapport aux routes, comme le mentionnait Alain MORAND lors de sa présentation. C'est par exemple le cas pour les données du Massif Jurassien détenues par nos collègues du centre de recherche KORA (Suisse).

● **Question 4 par Hervé BELLIMAZ :**

« Pourquoi ne pas utiliser un éco-tunnel de poids léger à la place d'un éco-pont, permettant une circulation dans et au-dessus du passage pour la faune (en dos d'âne) ? (Large de plus de 10 mètres, par exemple). Serait-ce réaliste pour sa réalisation, son coût ? »

Alain MORAND :

Il y a effectivement des pistes à creuser en matière d'innovation dans le domaine du génie civil. Déjà anciennement, le CETE devenu le CEREMA (notamment, la section des ouvrages d'art) ont déjà étudié de tels aménagements d'éco-passage en différents types de matériaux et de conception. Il s'agirait de poursuivre de tels travaux à leur côté avec une entrée plus spécifique "Lynx" pour optimiser la conception de tels passages.



- **Question 5 par Delphine SOUILLOT (ex-stagiaire CEREMA en 2018 sur le projet ERC-Lynx) :**

« A partir de quel seuil, dans l'outil ERC-Lynx, le taux de mortalité est acceptable pour des aménagements simulés ? »

Olivier GIMENEZ :

Toutes les caractéristiques nécessaires à l'évaluation des impacts de projets d'aménagement sont décrites dans la présentation de l'outil ERC-Lynx de Sarah BAUDUIN (notamment les indices de viabilité).

Sarah BAUDUIN (OFB) :

Après réflexions au sein de l'équipe projet, nous avons pris le parti de ne pas donner de seuil de validation des projets ou scenarii d'aménagement. L'outil ERC-Lynx ne fournit que les valeurs à chaque échelle à titre indicatif, et la décision finale de mettre en place le projet revient à l'aménageur et aux services instructeurs comme les DREAL, du fait de la nature « d'aide à la décision » de l'outil.

- **Question 6 : par Francisque BULLIFFON (LPO) :**

« L'outil ERC est adapté, semble-t-il, au réseau routier, mais est-il possible de simuler d'autres types de projets comme par exemple des projets éoliens ou la création de zones industrielles en jouant sur l'anthropisation des habitats (sans faire varier le réseau routier) ? »

Sarah BAUDUIN :

Cela dépendra des effets concrets de ces projets (sur le terrain). Par exemple, pour les aménagements éoliens, si la zone vient à être complètement rasée, les modifications d'habitats pourront être renseignées dans l'onglet « modifier le paysage » en détournant la zone (polygone) et en remplaçant le couvert par une zone de **présence humaine**.

Cette catégorie comprend les zones urbaines, industrielles, installations publiques, zones portuaires, zone d'extraction de minéraux et chantiers (toutes ces zones induisant un dérangement du Lynx). Cependant, le changement ne concernera que le couvert paysager, et non les autres types de dérangement tels que l'augmentation du bruit, etc.

Il s'agira d'étudier comment les aménagements envisagés pourront être traduits sous les différentes options modifiables par l'utilisateur (les quatre modifications possibles celle du réseau routier, du couvert et des populations de Lynx cité dans la présentation de l'outil ERC-Lynx).

- **Question 7 par Yannick AUTRET (CGDD) :**

« Dans le cadre d'ITTECOP, les projets sont amenés à être Open Source. Peut-on envisager que d'autres équipes, bureaux d'études et centres de recherches adaptent cet outil pour d'autres espèces animales ? En résumé, quel est le degré d'adaptabilité de l'outil à d'autres critères ? »

Sarah BAUDUIN :

Comme expliqué au cours de la présentation de l'outil, ce dernier est basé sur deux composantes : l'**interface utilisateur** et le **modèle biologique de Lynx**.



L'interface utilisateur pourrait tout à fait être reprise pour les autres espèces. Cependant, le modèle biologique devra être adapté à ces dernières. Par exemple, pour tester l'outil sur des populations de sangliers, il devra présenter un modèle biologique qui reproduit les processus écologiques de cette espèce liés à l'impact du réseau routier et des habitats.

Egalement, ajouter de nouveaux types d'aménagements concernant le Lynx (doublement de voies, etc.) pourra être appliqué à l'interface, mais cela nécessitera d'intégrer ces variations au modèle individu centré.

De ce fait, la reprise de l'outil pour une autre espèce ou de nouveaux aménagements est faisable, mais nécessitera un certain travail d'adaptation des modèles biologique et individu centré.

● **Question 8 :**

« Dans le cas particulier de la création d'un ouvrage de franchissement (passage à faune), modèle ne pourrait-il pas évaluer de lui-même l'endroit le plus approprié pour favoriser la dynamique de population du Lynx ?»

Sarah BAUDUIN :

Nous pourrions pour répondre à cette problématique tester plusieurs scénarios sur différentes localisations de passage à faune pour les comparer entre eux par la suite. Il serait de ce fait possible de voir quel endroit maximiserait au mieux l'impact positif sur les populations de Lynx. Cependant, le temps de simulation étant assez lent (quelques jours), il est préférable de réduire le nombre de scénarios à tester avec d'autres outils en amont.

Yannick AUTRET (CGDD/MTE/ITTECOP) :

Il est également possible lorsque l'on se penche sur cette question, d'utiliser des outils de simulation préexistant, comme ceux du projet GRAPHAB (ITTECOP 2008-2009). Cet outil permet de faire des simulations de plusieurs scénarios possibles de localisation de passage à faune, avec une possibilité de hiérarchisation en fonction des typologies d'espèce. Tout comme l'outil ERC-Lynx, il aide à la décision pour la réalisation de projet sur les infrastructures de transport, et peut être utilisé conjointement ou en amont à l'outil ERC-Lynx dans ce cas-là.

● **Question 9 :**

« Au vu de la présentation de Sarah BAUDUIN, et vu la surface couverte par le projet, il serait important de réfléchir à la communauté des utilisateurs de l'outil ERC-Lynx pour avoir les retours d'expérience en terme de fonctionnalité, de contraintes et autres. C'est ce que nous avons pu voir avec les précédents projets (GRAPHAB, etc.), et cela doit être un point important pour la suite au niveau de l'équipe projet »

Sarah BAUDUIN :

C'est effectivement un point que nous avions en tête au sein de l'équipe projet. L'amélioration post-déploiement de l'outil se basera en grande partie sur les retours de ses différents utilisateurs. Il s'agissait également de l'une des thématiques principales de l'atelier n°3, que l'on a réalisé avec les acteurs du territoire. Une première version d'essai de l'outil leur a été présenté pour qu'ils prennent en main ses caractéristiques et testent la création de scénarios d'aménagement. Le but final étant de partager et de recueillir les remarques et les pistes d'améliorations de l'interface et de son utilisation.



● **Question 10 par Anne PETIT (SNCF Réseau) :**

« Comment est qualifié le réseau ferré dans l'outil au niveau de la distinction des lignes ? »

Sarah BAUDUIN :

Cette réflexion fait partie des éléments que nous souhaiterions intégrer dans une future version de l'outil, car le réseau ferroviaire n'est actuellement pas considéré dans l'outil, du fait du manque de données de collisions de Lynx/train. Le modèle ne pouvant pas être calibré à ce niveau, il n'était pas possible de l'intégrer dans le modèle individu centré. L'impact des voies ferrées se situera plus au niveau du modèle de dispersion, aux côtés des routes, plutôt qu'au niveau des collisions réels (du fait des faibles effectifs de données).

Anne PETIT :

Il serait effectivement intéressant d'affiner les caractéristiques ferroviaires dans l'outil du fait de ses répercussions en terme d'effet cumulés plus que de réelles collisions Lynx/véhicule. Les caractéristiques changent en fonction de la typologie de nos voies ainsi que les aménagements qui les accompagnent (clôtures, etc.), ce qui peut effectivement impacter les espèces.

Sarah BAUDUIN :

Il s'agit à l'heure actuelle d'un manque de données disponibles, notamment au niveau de l'inventaire des passages à faune en France ainsi que des dispositifs de clôtures des autoroutes et voies ferrées, etc. Ces données sont accessibles localement, mais à l'échelle de notre aire d'étude (France, Allemagne et Suisse), des campagnes de collectes sont en cours et il sera ainsi possible d'ajouter ces modifications à notre outil.

Christophe DUCHAMP (OFB) :

Il est vrai que les effets cumulés sont une partie très importante à considérer sur le long terme, à plusieurs échelles spatiales. Il s'agit d'un point de perspective intéressant pour la suite du projet. Il est très important de pouvoir mobiliser la totalité des jeux de données disponibles de manière homogène, notamment à l'échelle d'emprise de ce projet. Toutes les personnes pouvant contribuer à mobiliser ce genre de données sont les bienvenus pour y collaborer.

Luc CHRETIEN (CEREMA Dter-Est) :

A l'heure actuelle, les impacts cumulés des projets d'aménagements des infrastructures de transports à ces échelles-là, restent très mal considérés dans la séquence ERC en général, et cet outil ERC-Lynx peut apporter un supplément d'analyse pour les intégrer de manière plus pertinente.

Alain MORAND :

Pour compléter l'information d'Anne PETIT, il existe une compilation nationale de données d'ouvrages mixtes ou spécifiques à faune sous le pilotage d'Éric GUINARD (antenne CEREMA à Bordeaux), qui pourra être rendu disponible très probablement d'ici 2022 ou 2023. Egalement, une



autre source de données pourrait être apporté par le projet européen BISON (projet H2020) en cours actuellement, concernant de nombreux champs d'écologie de la route et plus d'une dizaine de pays partenaires à ce projet. Enfin, il existe un rapport du MNHN de 2012 faisant une synthèse des collisions Lynx/train à hauteur estimée d'environ 5% de la mortalité par les collisions qui peut permettre d'amorcer l'intégration des voies ferroviaires dans le modèle.

Yannick AUTRET :

Un travail est effectivement réalisé au niveau européen avec la collaboration de nombreux acteurs (CEREMA, OFB, etc.) sur la consolidation des ressources de la thématique transport et biodiversité, pour établir le prochain agenda stratégique qui alimentera la commission européenne sur ces sujets-là. Les questions de collisions sont partagées au niveau européen, par exemple par le travail du centre de recherche de transport tchèque, qui a beaucoup travaillé sur ces thématiques. Ce que le projet ERC-Lynx montre, c'est la nécessité d'une collaboration et d'une standardisation à l'échelle européenne du recueil de ces éléments dans les années à venir. La biodiversité se joue des frontières et le maintien des connexions des grandes zones écologiques ne peut être assurée qu'à des échelles dépassant le national, comme nous en parlerons en conclusion de cette journée.



● Bilan et perspectives de l'outil ERC-Lynx

Intervention d'Olivier GIMENEZ (CEFE-CNRS)

Nous allons donc conclure cette journée par la présentation d'un bilan rapide et de certaines des perspectives les plus encourageantes du projet ERC-Lynx.

L'un des points qui semble le plus important, est **la création de collaborations** autour de ce projet entre scientifiques, services de l'Etat, gestionnaires des Infrastructures de transports Terrestres et acteurs de la conservation du Lynx.



Réunion de lancement du projet ERC-Lynx le 05/03/2018 à Besançon.

Premier atelier du projet ERC-Lynx le 05/06/2018 à Besançon.

Deuxième atelier du projet ERC-Lynx le 27/09/2018 à Besançon.

Troisième et dernier atelier de travail du projet ERC-Lynx le 24/09/2019 à Besançon.

Nous avons également développé un modèle pour l'évaluation de l'impact d'aménagements du territoire via les quatre indices de viabilité du Lynx :

- Collisions entre Lynx et véhicules.

- Lynx en dispersion

- Occupation du territoire

- Densité de Lynx

L'outil ERC-Lynx a été rendu disponible via une interface logiciel ergonomique que nous a présenté Sarah BAUDUIN, et a encouragé la production de connaissances pour la conservation du Lynx en France.

Le travail de Master de nos stagiaires n'a pas pu être abordé aujourd'hui mais a été important dans ce projet, que ce soit celui de Charlotte-Anaïs OLIVIER sur les corridors écologiques, comme celui de Delphine SOUILLOT sur une typologie des tronçons accidentogènes et la recherche de variables « transport » en vue d'alimenter l'outil de modélisation. Leurs rapports de stages sont disponibles sur le site du projet, ou sur simple demande auprès de l'équipe.

L'outil est pris en compte de manière importante dans le PNA et le PRA Massif des Vosges, et les DREAL impliquées affichent une **réelle volonté de le déployer à l'avenir**. Nous tenons à les remercier car rien n'est plus valorisant que de savoir que le travail réalisé est utilisé. A terme, nous voyons l'outil comme une **étape complémentaire**, c'est-à-dire un outil d'aide à l'application de la séquence ERC avec un vrai accompagnement dans le choix du projet le moins impactant, une évaluation des effets de mesures ERC et une aide à la prise de décision sans toutefois fournir des réponses clés en main.

Enfin, quelques éléments de valorisation du travail que nous avons effectué sont notables comme :

- Des articles scientifiques à soumettre sous peu et en préparation, notamment sur le futur des populations de Lynx de l'Europe de l'ouest à 50 ans, issus d'une collaboration avec nos collègues suisses et allemands.

- Plusieurs autres articles à un stade moins avancé que nous soumettrons fin 2021 début 2022 :

- Un écrit sur le modèle et l'interface, la partie technique de l'article précédemment cité précédent.



- Deux autres articles qui se concentreront sur les collisions et l'habitat favorable.
- Un article réalisé par notre collègue Agnès MECHIN qui nous a accompagné dans une réflexion pour évaluer notre démarche de co-construction de l'outil.

Certaines communications à visées nationales ont été effectuées autour des enjeux de biodiversité, sur l'ingénierie et l'aménagement du territoire :

- Un article dans la Lettre d'information nationale sur la Trame verte et bleue pour informer sur l'existence du projet ERC-Lynx.

- Un article dans la revue « The Conversation » au titre de « Mieux connaître le Lynx grâce à l'écologie statistique ».

- Des articles d'information sur les sites de l'OFB et du CEREMA.

- Des articles dans la lettre d'actualité de la SFEPN et dans le dernier numéro du Courrier de la Nature.

L'équipe avait été très active à l'échelle nationale et internationale avec plusieurs participations à des conférences, colloques et séminaires.

Enfin, nous avons un site web et une plaquette d'information qui nous permettent de communiquer sur le projet ERC-Lynx.

ZOOM SUR...

Un projet de recherche pour réduire la mortalité du lynx par collision

Les populations de lynx sont mises à mort, notamment par les infrastructures de transport. Le projet de recherche ERC-Lynx vient d'être lancé pour offrir d'ici 2020 un outil permettant de prévoir les risques de collision et la viabilité des populations de lynx.

Les lynx, victimes des infrastructures de transport

Les infrastructures de transport terrestres et leurs aménagements (ITTA), qu'elles soient routières ou ferroviaires, font courir des risques majeurs au lynx boréal, l'un des derniers grands carnivores européens présent en France. Les ITT se situent en effet à détruire et modifier les habitats favorables au lynx et constituent un réel frein à leur dispersion, un processus indispensable au maintien des populations en bon état de conservation. Ce projet s'ajoute aux collisions avec les véhicules qui représentent l'une des principales causes de mortalité.

ERC-Lynx : un projet de recherche pour 2018-2020

Afin d'apporter une réponse à cette situation, le projet de recherche appliquée « Éviter, réduire et prévoir le risque de mortalité du lynx par collision avec les véhicules de transport / ERC-Lynx » a été initié le cadre de l'ITTECOP. Ce projet est porté par un regroupement composé des organismes suivants :

- Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive (Cef) ;
- Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema) ;
- Centre de recherche et coordination sur les carnivores (Croc) ;
- Office français de la chasse et de la faune sauvage (ONCFS).

Il a une durée de 2 ans et demi (2018-2020) et pour objectif de développer un outil prédictif à destination des gestionnaires des infrastructures de transport terrestres permettant de prévoir les risques de collision et la viabilité des populations de lynx au regard du territoire, de ses enjeux, en lien avec les infrastructures existantes et les nouveaux projets.

THE CONVERSATION

Mieux connaître le lynx boréal grâce à l'écologie statistique

PROJET ERC-LYNX

THE COURRIER DE LA NATURE

Les lynx en France et dans le monde

ERC-LYNX

Éviter, réduire et compenser la mortalité du Lynx par collision avec les véhicules de transport

Lynx boréal, nouvelles d'ici et d'ailleurs

PROJET ERC-LYNX

Appel à projet ITTECOP 2017-2020

Eviter, Réduire et Compenser le risque de mortalité du Lynx boréal (Lynx lynx) par collision avec les véhicules de transport terrestres.

OBJECTIFS ET ENJEUX DU PROJET

Le développement des infrastructures de transport terrestres (ITT) et le mouvement croissant des voyageurs ont un impact sur la faune sauvage, ce travers le risque de collisions avec les véhicules et la perte d'habitats.

Le taux de mortalité des lynx, une des trois espèces protégées de grands carnivores en France, n'échappe pas à ces menaces. Plus particulièrement, les collisions avec les véhicules sont l'une des principales causes de mortalité du lynx en France et ailleurs en Europe.

Ainsi, les projets d'aménagement (qui sont nombreux ces dernières années) sont l'opportunité pour le chercheur de suivre les populations de lynx à plus ou moins long terme. D'ailleurs, les porteurs de projets d'aménagement entreprennent dans des zones où le lynx vit, des études de suivi et de modélisation pour évaluer l'impact environnemental et mettre en œuvre le schéma « Éviter-Réduire-Compenser » (ERC).

C'est dans ce contexte que le projet ERC-Lynx a été développé comme un outil d'aide à la décision pour éviter les réflexions autour des projets d'aménagement et guider les acteurs du territoire sur le choix le moins impactant. Pour cela, il évalue les effets de ces projets sur la mortalité et sur la viabilité des populations de lynx à l'horizon de 50 ans.

ÉQUIPE PROJET

L'équipe projet est composée de membres du Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive (Cef), du Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema), du Centre de recherche et coordination sur les carnivores (Croc) et de l'Office français de la Biodiversité (ONCFS).

Partenaires

Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive (Cef) ; Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema) ; Centre de recherche et coordination sur les carnivores (Croc) ; Office français de la chasse et de la faune sauvage (ONCFS).

Programme • ITTECOP



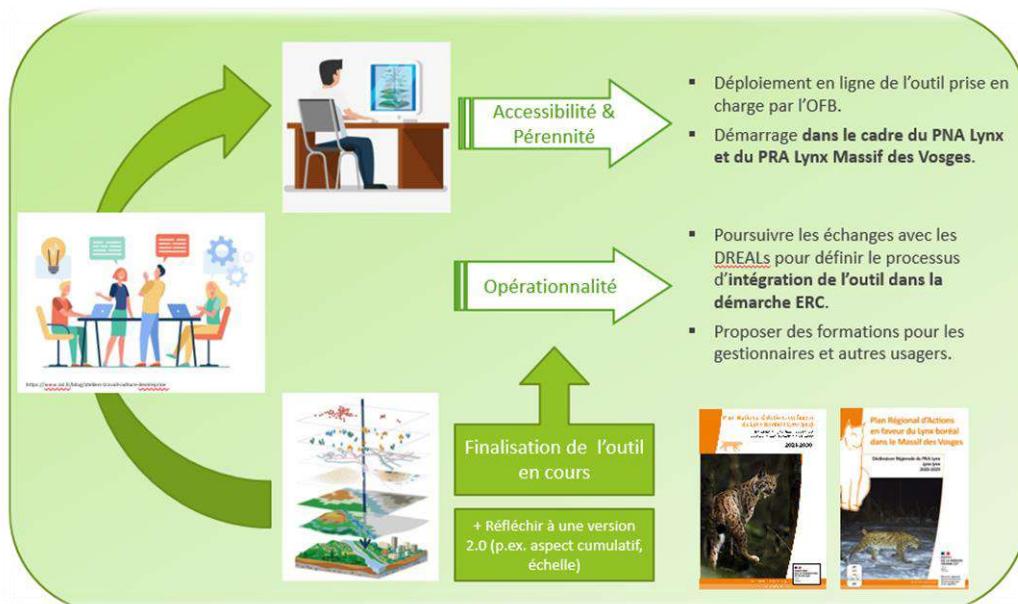
Intervention Luc CHRETIEN (CEREMA Est) :

Toute la difficulté d'un projet tel que « ERC-Lynx » est de mettre à disposition de nombreuses données complexes pour qu'un utilisateur puisse répondre à ses besoins de manière opérationnelle. Cela implique donc la pertinence technique et fonctionnelle de l'outil, ainsi que son opérationnalité et son accessibilité pérenne et facile. Ces aspects ont été développés tout au long du projet et continuent de l'être par notre équipe. L'outil est aujourd'hui en cours de finalisation pour pouvoir remplir pleinement ses fonctions, et des enjeux de stabilisation de son fonctionnement sont étudiés, comme par exemple au niveau des passages à faune (comme l'a évoqué Sarah BAUDUIN pendant la présentation des scénarios fictifs), mais également au niveau de l'inclusion des routes dans le modèle de mouvement.

En dehors des aspects techniques, l'enjeu est également de continuer les échanges développés avec les services de l'état pour intégrer l'outil dans la séquence ERC, mais aussi avec les gestionnaires d'infrastructures de transport et autres acteurs de la conservation du lynx, de manière à créer une culture commune entre le monde de la route et de l'environnement, qui possèdent parfois des approches différentes de la problématique. Nous avons vu que depuis le début du projet, ces échanges pouvaient être bénéfiques, et nous souhaitons continuer à développer cette communication via notamment des tests de scénarios concrets d'aménagement, des formations pour les gestionnaires, et/ou retours d'expérience. Enfin, l'outil va se décliner dans le cadre du développement du PNA et du PRA lynx.

Concernant son accessibilité et sa pérennité, il existe un enjeu d'optimisation de la présentation des résultats pour que la compréhension par ses usagers soit optimale. Le déploiement de l'outil en ligne via une prise en charge de l'OFB sera également un point fort à développer à l'avenir, du fait de la longueur du traitement (difficile à mettre en place sur chaque ordinateur indépendant).

Une version future de l'outil (2.0) permettrait d'explorer de nouveaux champs comme l'impact cumulatif des aménagements (difficile à appréhender en temps normal dans la séquence ERC), d'examiner les indices de viabilités aux différentes échelles, et également d'ajouter des champs de données supplémentaires (cartographie des passages à faune, etc.). Enfin, une interconnexion avec les données des pays voisins (Suisse, Allemagne, etc.) pourra apporter un champ d'évolution supplémentaire de l'outil ERC-Lynx.





Nous arrivons donc à une étape finale de la mise en route de l'outil, avec les possibilités d'améliorations évoquées tout au long de cette journée. Le champ des perspectives est très élevé avec plusieurs pistes d'améliorations, mais son efficacité technique ne sera valorisée qu'avec le développement de **son accessibilité et de sa pérennisation**.

Nous avons beaucoup parlé des atouts techniques de l'outil ERC-Lynx, mais cela ne doit pas éclipser le relationnel qui a été acquis au cours de ces années de développement du projet, c'est-à-dire notre capacité à trouver des langages communs et des terrains d'échanges avec des acteurs qui n'avaient peut-être pas l'habitude de communiquer entre eux. Un grand merci donc à tous les partenaires et les acteurs qui ont permis d'échanger autour de cette problématique, et de l'outil ERC-Lynx en particulier.

Référence de l'intervention :

GIMENEZ O. et CHRETIEN L. (2021) Bilan et perspectives de l'outil ERC-Lynx *In: Les actes de la journée de restitution du projet ERC-Lynx : Eviter, réduire et compenser la mortalité du Lynx boréal par collision avec les véhicules de transport. Webinaire du 4 juin 2021, Projet ITTECOP 2018-2020, CEFE/Cerema/CROC/OFB. p 58-61*



• Conclusion journée de restitution ERC-Lynx

Intervention de Yannick AUTRET (CGDD/MTE/ITTECOP)

Nous allons terminer cette journée de restitution de l'ERC-Lynx par des félicitations pour l'importance du travail qu'a fourni l'équipe de ce projet. Nous suivons le Lynx depuis de nombreuses années, puisque cette espèce a été le sujet des tous premiers projets financés dans le cadre des programmes ITTECOP à la fin des années 2000.

Ce projet ERC-Lynx est donc l'héritier de nombreuses années de travail qui ont été menées, en capitalisant sur les connaissances préexistantes, et qui montrent l'importance de la recherche dans la durée pour ces thématiques.

Nous saluons également Jean CARSIGNOL, présent pour ce colloque, qui a été un élément moteur au niveau national, européen et au-delà de la prise en compte de la biodiversité au niveau des infrastructures de transports. Son impulsion a été déterminante pour la mise en place de projets tels que celui-ci. Les travaux que Jean-Michel GAILLARD a initiés au début des années 2000 ont été repris pour développer la connaissance de la communauté des acteurs et des territoires, et pour préparer la venue de projet tel que celui de l'ERC-Lynx.

Ces programmes de recherche qui parfois sont difficiles à soutenir, entraînent cette appropriation de connaissances indispensables pour les objectifs d'anticipation qu'ils visent. Voir les aboutissements de cette recherche dans les projets comme l'ERC-Lynx est aujourd'hui une véritable satisfaction.

L'ensemble des acteurs présents aujourd'hui ont appris à se connaître et travailler vers des objectifs communs. L'un des défis actuels de la recherche est son ouverture hors du cercle des chercheurs pour agrandir ses possibilités de réussite vers des succès partagés, via des collaborations interdisciplinaires. L'animation de l'équipe ERC-Lynx et sa capacité à intégrer la diversité des champs disciplinaires avec leurs contraintes respectives dans un contexte délicat en terme de cohésion (COVID-19), est une preuve de grande réussite et mérite d'être félicité.

Ce projet est également représentatif des objectifs d'ITTECOP, c'est-à-dire de développer une synergie dans la recherche appliquée, avec des partenariats entre tous les acteurs impliqués dans ce programme (ministère, l'ADEME, OFB, opérateurs d'infrastructures, etc.).

Nous saluons en conclusion toute l'équipe ERC-Lynx pour son travail et souhaitons une belle réussite pour ce projet et les perspectives qu'il dessine.

Référence de l'intervention :

AUTRET Y. (2021) Conclusion de la journée de restitution ERC-Lynx In: Les actes de la journée de restitution du projet ERC-Lynx : Eviter, réduire et compenser la mortalité du Lynx boréal par collision avec les véhicules de transport. Webinaire du 4 juin 2021, Projet ITTECOP 2018-2020, CEFE/Cerema/CROC/OFB. p 62



● Liste des participants

ANTOINE Pauline
ARZUR Marine (DREAL GE)
AUTRET Yannick (CGDD/ITTECOP)
BAJART Vianney
BARIOD Léa
BAUDUIN Sarah (OFB)
BELLIMAZ Hervé (FNE BFC)
BILLON Virginie (CEREMA)
BOLAN Nicolas
BRESSAN Yoann (OFB)
BULLIFFON Francisque (LPO)
BUSSON Emilie (CEREMA)
CARSIGNOL Jean
CHESNAIS Maxime (OFB39)
CHEVARIN Jérôme (APRR)
CHRETIEN Luc (CEREMA)
COLLIN-HUET Marie-Pierre (DREAL BFC)
COUDRY Karen (Région BFC)
DERREZ Alexandre (FDC67)
DRAIS-CANOVAS Eléonore (CeA)
DROUET-HOGUET Nolwenn (OFB)
DUCHAMP Christophe (OFB)
DUPUIS Ondine (LPO-BFC)
GACECK Ludovic (APRR)
GAGNAISON Candice
GATTIS Sylvain
GILARD Clément (SHNA)
GILLES Christophe (FNE 74)
GIMENEZ Olivier (CNRS-CEFE)
HANS Théo-paul
HETIER Sabine (DDT39)
HETTE-TRONQUART Nicolas (OFB)
JANIN Julie
JUMEAU Jonathan (CeA)
LAITHIER Morgane
LEFRANC Philippe (DREAL BFC)
LEMAIRE Marine
MARGERIE Bénédicte
MORAND Alain (CEREMA)
MORELLE Stéphanie
PACOU Damien (MTE)
PIANFETTI Loïc
PICH François (APRR)
PIERRE Sarah (DREAL BFC)
PIZZO Margaux
PLANQUIN Betty (OFB)
PROANO Estelle
RAOUL-DUVAL Judith (ITTECOP)
RICHARD Yolan
SAGE Mickael
SAINT-ANDRIEUX Christine (OFB)
SALAS Michel (OFB)
SCERRI Lea
SCHMITT Noëlle
SCHOENSTEIN Olivier
SEUREAU Lou
SILVA-LASSALLE Louise
SOUILLOT Delphine
TISSERON Gaëtan (Biotope)
VALENTIN Marie
VANPE Cécile (OFB)



● Liste des sigles

ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie

CEFE : Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive

CEN : Conservatoire d'Espaces Naturels

CEREMA : Centre d'Etudes et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement

CGDD : Commissariat Général au Développement Durable

CNRS : Centre National de Recherche Scientifique

CROC : Centre de Recherche d'Observation sur les Carnivores

DDT : Direction Départementale des Territoires

DGITM : Direction Générale des Infrastructures, des Transports et de la Mer

DRAAF : Directions Régionales de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt

DREAL : Direction Régionale de l'Environnement de l'Aménagement et du Logement

FDC : Fédération départementale des chasseurs

FNE : France Nature Environnement

ITT : Infrastructure Terrestre de Transport

ITTECOP : Infrastructures de Transports Territoires, ECOsystèmes et Paysages

MTE : Ministère de la Transition Ecologique

OFB : Office français de la Biodiversité

ONCFS : Office National de la Chasse et de la Faune Sauvage

ONTVB : Orientation National Trame Verte et Bleue

PADDUC : Plan d'Aménagement et de Développement Durable de la Corse

PGPJ : Pôle Grands Prédateurs du Jura

PLUc : Plan Local d'Urbanisme Communal

PLUi : Plan Local d'Urbanisme intercommunal

PNA : Plan National d'Action

PNR : Parc Naturel Régional

PRA LMV : Plan Régional d'Action Lynx Massif des Vosges

RNN : Réserve Naturelle Nationale

RNR : Réserve Naturelle Régionale



SAR : Schéma d'Aménagement Régional

SCOT : Schéma de Cohérence Territoriale

SFEPM : Société Française pour l'Etude et la Protection des Mammifères

SHNA : Société d'Histoire Naturelle d'Autun

SRADDET : Schéma Régional d'Aménagement, de Développement Durable et d'Egalité des Territoires

SRCEA : Schéma Régional du Climat, de l'Air et de l'Energie

IUCN : Union Internationale pour la Conservation de la Nature

WWF : World Wide Fund for Nature ou Fonds Mondial pour la Nature



- Quelques liens utiles...

<https://sites.google.com/view/ercLynx/accueil>

<https://sites.google.com/view/programmeLynxmassifdesvosges/accueil>

<https://www.ofb.gouv.fr/actualites/grand-est-une-premiere-portee-de-Lynx-boreal-observee-dans-les-vosges-du-nord-depuis-le>

<http://www.iberlince.eu/index.php/eng/project#.YUs3FOxxc2w>



ANNEXE 2 : Bauduin S., Germain E., Zimmermann F., Idelberger S., Herdtfelder M., Heurich M., Kramer-Schadt S., Duchamp C., Drouet-Hoguet N., Morand A., Blanc L., Charbonnel A. & Gimenez O. Eurasian lynx populations in Western Europe: What prospects for the next 50 years? A soumettre à Biological Conservation.

- 1 **Eurasian lynx populations in Western Europe: What prospects for the next 50 years?**
- 2
- 3 Bauduin Sarah, Germain Estelle, Zimmermann Fridolin, Idelberger Sylvia, Herdtfelder Micha,
- 4 Heurich Marco, Kramer-Schadt Stephanie, Duchamp Christophe, Drouet-Hoguet Nolwenn,
- 5 Morand Alain, Blanc Laetitia, Charbonnel Anaïs, and Gimenez Olivier
- 6
- 7 Bauduin Sarah, Office français de la biodiversité, 147 avenue de Lodève, 34990 Juvignac,
- 8 sarah.bauduin@ofb.gouv.fr
- 9 Germain Estelle, Centre de Recherche et d'Observation sur les Carnivores, Lucy,
- 10 estelle.germain@croc-crea.org
- 11 Zimmermann Fridolin, Carnivore Ecology and Wildlife Management. KORA, Muri bei Bern,
- 12 Switzerland f.zimmermann@kora.ch
- 13 Idelberger Sylvia, Stiftung Natur und Umwelt Rheinland-Pfalz, Diether-von-Isenburg-Str. 7,
- 14 55116 Mainz, Silvia.Idelberger@snu.rlp.de
- 15 Herdtfelder Micha, Forest Research Institute of Baden-Wuerttemberg,
- 16 micha.herdfelder@forst.bwl.de
- 17 Heurich Marco, Chair of Wildlife Ecology and Management, Faculty of Environment and
- 18 Natural Resources, University of Freiburg, Tennenbacher Straße 4, 79106 Freiburg, Germany
- 19 Department of Visitor Management and National Park Monitoring, Bavarian Forest National
- 20 Park, Freyunger Straße 2, 94481 Grafenau, Germany
- 21 Faculty of Forestry and Wildlife Management, Campus Evenstad, Inland Norway University of
- 22 Applied Sciences, 2480 Koppang, Norway
- 23 Marco.Heurich@npv-bw.bayern.de

24 Kramer-Schadt Stephanie, Department of Ecological Dynamics, Leibniz Institute for Zoo and
25 Wildlife Research, Berlin, Germany ; Department of Ecology, Technische Universität Berlin,
26 Germany, kramer@izw-berlin.de

27 Duchamp Christophe, Office français de la biodiversité, Micropolis - La Bérardie F-05000 Gap,
28 christophe.duchamp@ofb.gouv.fr

29 Drouet-Hoguet Nolwenn, Office français de la biodiversité, 5 Allée de Bethléem, F-38610
30 Gières, nolwenn.drouet-hoguet@ofb.gouv.fr

31 Morand Alain, Centre d'études et d'expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et
32 l'Aménagement, Direction territoriale Est, Ile du Saulcy, 57045 Metz, alain.morand@cerema.fr

33 Blanc Laetitia, CEFE, Univ Montpellier, CNRS, EPHE, IRD, Montpellier, France
34 blanc.laetitia.esr34@gmail.com

35 Charbonnel Anaïs, Centre de Recherche et d'Observation sur les Carnivores, Lucy,
36 anais.charbonnel@laposte.net

37 Gimenez Olivier, CEFE, Univ Montpellier, CNRS, EPHE, IRD, Montpellier, France
38 olivier.gimenez@cefe.cnrs.fr

39

40 **Abstract**

41 Persistence of long-term viable populations may be uncertain for large carnivore species,
42 especially for those established in human-dominated landscapes. Here, we studied the Eurasian
43 lynx in Western Europe established in the Upper Rhine meta-population (i.e., Jura, Vosges-
44 Palatinian and Black Forest populations) and in the Alpine population. These populations are
45 currently considered as endangered or critically endangered due to a high anthropogenic
46 mortality and isolation. We assessed lynx persistence over a 50-year time horizon by building a
47 spatially-explicit individual-based model accounting for road mortality and habitat selection. For

48 the Alpine and Jura populations, forecasts showed a steady growth rapidly reaching a
49 stabilization phase with high resident female occupancy, and a positive growth for the newly re-
50 established Vosges-Palatinian population. Moreover, this population showed a difference in
51 female occupancy between the northern part, where a recent reintroduction program was
52 conducted in the Palatinate Forest, and the southern part. Only the group of individuals in the
53 Black Forest had an irregular growth with low female occupancy probably due to small
54 abundance and poor connectivity to surrounding populations. Exchanges of individuals between
55 populations were limited, and the Jura population played the role of a crossroad. Persistence of
56 lynx in Western Europe seems likely on a large scale over the next 50 years. However, lynx
57 persistence in the southern part of the Vosges-Palatinian population and in the Black Forest
58 appears more challenging without long-term conservation planning.

59

60 **Keywords:** *Lynx lynx*, population persistence, spatially-explicit individual-based model

61

62 **Introduction**

63

64 The Eurasian lynx (*Lynx lynx*) was eradicated in most Europe between the 17th and 20th centuries.
65 The main reasons for its disappearance were habitat degradation, human persecution and a
66 decrease in prey availability (Breitenmoser et al., 2000). The species has recently recolonized
67 parts of its historical range in Central and Western Europe thanks to different reintroduction
68 programs which started in the 1970s. Nowadays there are ten or eleven identified lynx
69 populations in Europe (Chapron et al., 2014; von Arx, 2020), and the species benefits from a
70 conservation status across its whole range area. Although the species is considered as “least
71 concerned” at the European level of the IUCN Red list, its status greatly differs from one

72 population to another, even though they share similar threats, mostly habitat fragmentation,
73 illegal killings and collisions with vehicles (von Arx, 2020). Long-term persistence remains
74 notably uncertain for the Alpine population (France and Switzerland) and for the Upper Rhine
75 meta-population, which encompasses the Jura population (France and Switzerland), the Vosges-
76 Palatinian population (France and Germany) and few individuals located in the Black Forest and
77 its surroundings (e.g., the Swabian Alb, Germany) (Drouet-Hoguet et al., 2021; Germain and
78 Schwoerer, 2021; Herdtfelder et al., 2021; Idelberger et al., 2021; Molinari-Jobin et al., 2021).
79 These populations are currently defined as endangered (Jura and Alpine) or critically endangered
80 (Vosges-Palatinian) (von Arx, 2020). Indeed, the populations forming the Upper Rhine meta-
81 population remain currently small and isolated. Only a few exchanges between them and with the
82 Alpine population are documented, probably because of habitat fragmentation and little
83 functional connectivity (Morand, 2016; Zimmermann and Breitenmoser, 2007). Low female
84 dispersal rate and movements most likely slow population expansion due to their risk-shy nature
85 compared to male lynx (Port et al., 2021). This situation, added to the common origin of the
86 reintroduced individuals from the Carpathian population (Breitenmoser et al., 1998; Vandel et al.,
87 2006), may lead to high inbreeding within populations (Breitenmoser-Würsten and Obexer-Ruff,
88 2003; Premier et al., 2020).

89 In this context, wildlife conservationists, scientists and policy-makers face significant
90 challenges for lynx conservation when individuals inhabit human-dominated landscapes. To
91 inform decision-making process for population conservation, several studies have used
92 individual-based models (IBMs). These bottom-up models flexibly integrate species demography
93 (dispersal, territory establishment, reproduction, mortality) and how animals interact with their
94 inhomogeneous environment (e.g., habitat selection, collisions, illegal killings) and other
95 individuals, while accounting for individual characteristics (e.g., sex, age, dispersal status).

96 Population-level results emerge from the individual-level simulations (Railsback and Grimm,
97 2012). These models are used for the management and conservation of large and small carnivores
98 (e.g., (Hradsky et al., 2019; Kramer-Schadt et al., 2011, 2005, 2004; Marucco and McIntire,
99 2010). Recent applications of IBMs for the lynx species concerned the estimation of illegal
100 hunting (Heurich et al., 2018), the link between movement on the genetic diversity (Premier et
101 al., 2020) and assessments of reintroduction scenarios (Ovenden et al., 2019; Philips, 2020).

102 Lynx are large carnivores with large spatial requirements (Breitenmoser-Würsten et al.,
103 2007). They are territorial and live in large connected forested areas (Vandel and Stahl, 2005;
104 Zimmermann and Breitenmoser, 2007) which sustain large prey populations (Basille et al., 2009).
105 Natural barriers (e.g., large waterbodies) as well as anthropogenic barriers (e.g., urban areas,
106 highways) limit lynx movements (Schadt et al., 2002). Roads are complex infrastructures acting
107 as semi-permeable movement barriers (Klar et al., 2006; Zimmermann and Breitenmoser, 2007)
108 as well as an important source of mortality (Bencin et al., 2019; Ceia-Hasse et al., 2017).
109 Therefore, a major modelling challenge when simulating lynx populations is to account for
110 movements over large areas and consequently, for the impact of landscape characteristics on
111 different demographic processes such as dispersal, territory establishment and survival rates.
112 Because simulation rules in IBMs are defined at the individual level, these models appear as a
113 great tool to integrate the complex interactions between landscape characteristics and both lynx
114 demographic and spatial processes to simulate population changes on a large scale.

115 Our study aimed to assess the long-term persistence of the Eurasian lynx in the large
116 range area delimited by the Upper Rhine meta-population and the Alpine population. We build a
117 spatially-explicit IBM that integrates up-to-date information on lynx ecology while accounting
118 for habitat preferences and the risk of collisions with vehicles. We implement our model in the R
119 programming language and share it publicly with open-source code allowing full reproducibility

120 and its adoption by ecologists and conservationists. We use this model to forecast the fate of lynx
121 populations over a 50-year time horizon. Finally, we provide several population metrics that help
122 in diagnosing the long-term species persistence in its most western range area.

123

124

125 **Material and Methods**

126

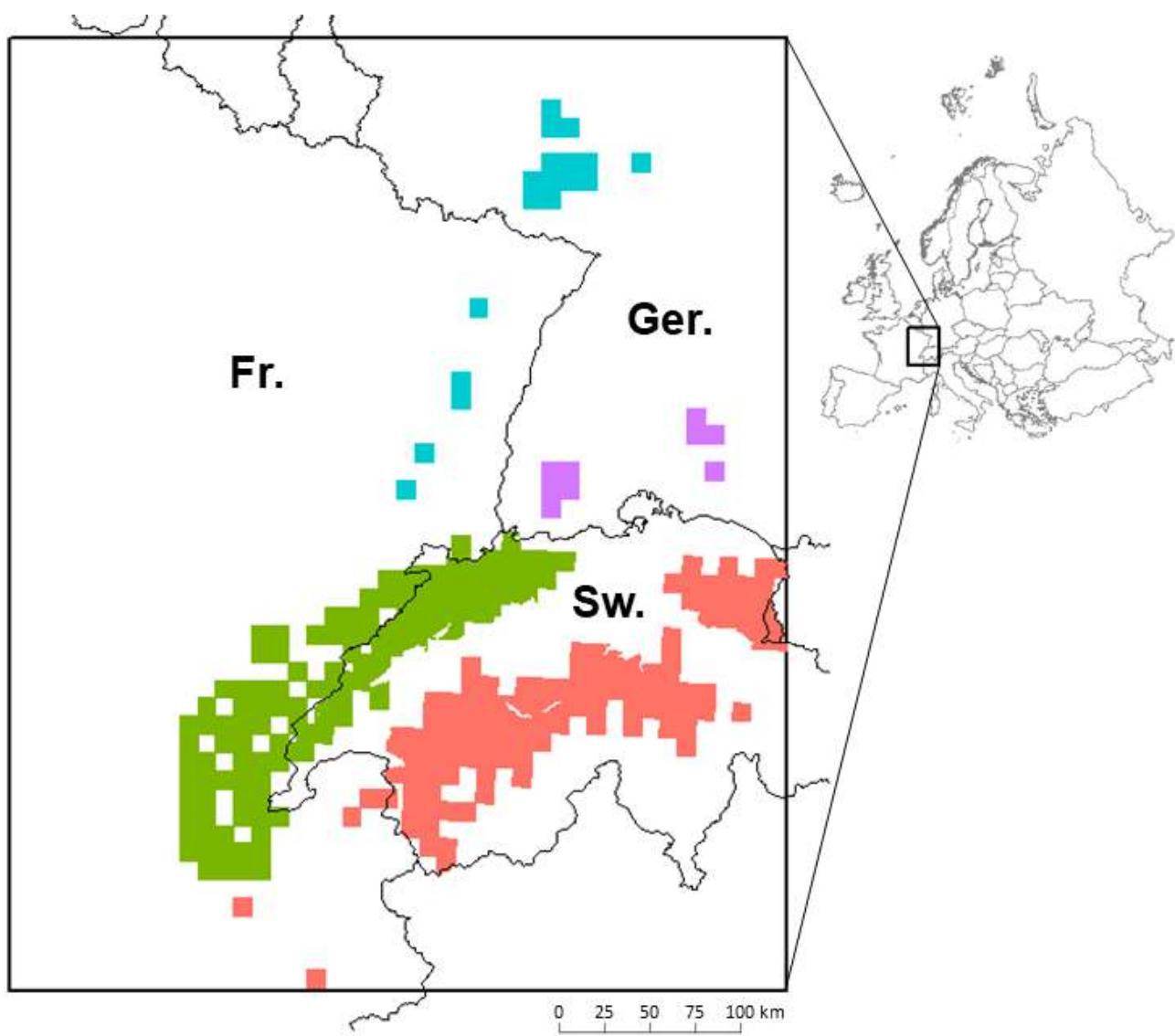
127 *Study area and populations*

128 We conducted the study on Eurasian lynx (*Lynx lynx*) populations located in France, Germany
129 and Switzerland (Fig. 1). The three main populations inhabiting the vast mountainous and
130 forested areas of these countries are the Vosges-Palatinian (France-Germany), the Jura (France-
131 Switzerland) and the Alpine (France-Switzerland) populations (von Arx, 2020). Some individuals
132 were also observed in the Black Forest and its surroundings (e.g., Swabian Alb) in Germany (Fig.
133 1), but were not considered as a lynx population *per se* (von Arx, 2020). Therefore, we should
134 refer to “mountain ranges” when speaking of the Vosges-Palatinate, Jura, Alps and Black Forest
135 with its surroundings, but for simplicity and clarity, we will use “populations” throughout our
136 paper.

137 The Jura and Alpine populations originated from individuals reintroduced in Switzerland
138 in the 1970s (Breitenmoser et al., 1998; Vandel and Stahl, 2005) followed by a natural
139 recolonization of the territories westward. After the complete decline of the Vosges-Palatinian
140 population in the 18th century, a reintroduction of 21 lynx occurred in the southern part of the
141 Vosges Mountains (France) between 1983 and 1993 (Vandel et al., 2006). Only 10 individuals
142 contributed to the lynx local establishment (Vandel et al., 2006) without conclusive stabilization
143 (Charbonnel and Germain, 2020). Since 2016, the lynx has been back in the Palatinate Forest

144 (Germany) thanks to a new reintroduction program under way until 2021 (Scheid et al., 2021;
145 Schwoerer, 2021) with a few individuals that already moved to the Vosges Mountains (Scheid et
146 al., 2021; Schwoerer, 2021). Finally, only a few male individuals have been observed in the
147 Black Forest area since 2013, most of them coming from the Swiss Jura Mountains
148 (Mitarbeitende der Stiftung KORA, 2017; Wölfl et al., 2021). Lynx regular occurrences are
149 yearly documented by the three countries.

150



151

152 **Figure 1:** Eurasian lynx presence as available in 2017-2018 in France (Fr.), Germany (Ger.) and
153 Switzerland (Sw.) in the study area (black rectangle). Data for France cover the period from
154 01/04/2013 to 31/03/2017 (OFB Réseau Loup-Lynx), for Germany from 01/05/2017 to
155 30/04/2018 (Bundesamt für Naturschutz) and for Switzerland from 01/01/2015 to 31/12/2017
156 (KORA). We used a standardized 10x10 km grid from the European Environment Agency for
157 France and Germany, and a grid derived from the 1:25,000 map for Switzerland). The four colors
158 are for the four different populations: the Vosges-Palatinian population (blue; 1,800 km²) with
159 cells in France (Vosges Mountains) and Germany (Palatinate Forest), the Black Forest population
160 (purple; 900 km²) in Germany, and the Jura (green; 12,057 km²) and the Alpine (red; 11,190 km²)
161 populations with cells in France and Switzerland. Top right corner inset: Europe with the location
162 of the study area.

163

164 *Lynx population persistence*

165 Based on previous works by Kramer-Schadt et al. (2004, 2005, 2011), we built a spatially-
166 explicit individual-based model (SE-IBM) to simulate lynx populations dynamics and dispersal,
167 while accounting for the risk of lynx-vehicle collisions and lynx habitat preferences. A SE-IBM
168 is an IBM where individual responses to behavioral rules are constrained by environmental
169 characteristics. Our lynx SE-IBM is made of four components (Appendix A). The first
170 component represents the impact of road network on lynx survival via predicted collision
171 probabilities. The second component represents the impact of land cover on lynx space use with
172 the definition of different lynx habitat types. These first two components are spatial layers
173 influencing the behavioral rules followed by simulated lynx individuals. The third component
174 represents the initial lynx populations made of lynx individual's location and characteristics used
175 to launch the SE-IBM. The fourth component details all SE-IBM rules including lynx

176 demography, dispersal movement and establishment. A complete description of the four model
177 components is available in Appendix A, and the SE-IBM structure following the Overview,
178 Design concepts, and Details (ODD) protocol (Grimm et al., 2010, 2006) is provided in
179 Appendix B.

180 We ran 200 replicates of the lynx SE-IBM forecasting the populations over 50 years. We
181 used a different initial population (Appendix A) at each replicate to avoid any bias due to the
182 initial locations of the simulated individuals. We defined a burn-in phase of 10 years after the
183 start of the simulation (i.e., this phase is not included in the conclusions of the analyses) to let the
184 population settle down and start with a stable system. We also removed all mortalities during the
185 first year of simulation to allow all individuals to find a territory, if they can, without dying while
186 doing so. In order to evaluate lynx persistence, we looked at model predictions regarding: a)
187 population growth rates, b) establishments outside of the lynx native population, and c) female
188 territory occupancy.

189 a) We extracted the number of individuals in each population, for every year and for each
190 replicate. Then, we calculated the growth rate for each replicate and each population over the
191 simulated years as the number of individuals at time t divided by the number of individuals at
192 time t-1. Furthermore, we calculated the mean growth rate per year and per population, and the
193 95% confidence interval of the mean over the 200 replicates.

194 b) We extracted the number of times individuals established their territory in a population
195 area which was not the one in which they were born (“Population layer”, Appendix A) for every
196 year and for each replicate. We did not account for individuals which moved to another
197 population area during their dispersal but finally came back to their native population area to
198 establish, nor those who died in another population area while dispersing. We calculated the
199 cumulative sum of these movements over the simulated years for each replicate and for each

200 movement type (e.g., from the Alpine to the Jura population, from the Jura to the Vosges-
201 Palatinian population). Then, we calculated the mean and 95% confidence interval of the mean
202 across all replicates.

203 c) We extracted female territory locations at the last year of simulation for each replicate.
204 We focused on female territories as male territories are based on those of the females. We
205 assigned a “1” each cell of the gridded study area (1 km^2) that was occupied by a female territory
206 and a “0” otherwise. Finally, we estimated territory occupancy by calculating the mean value per
207 cell from these rescaled maps over the 200 replicates.

208 We also did a visual validation of our model predictions using GPS and VHF tracks from
209 several collared female residents that we overlaid on the resulting territory occupancy map
210 (Appendix C).

211

212

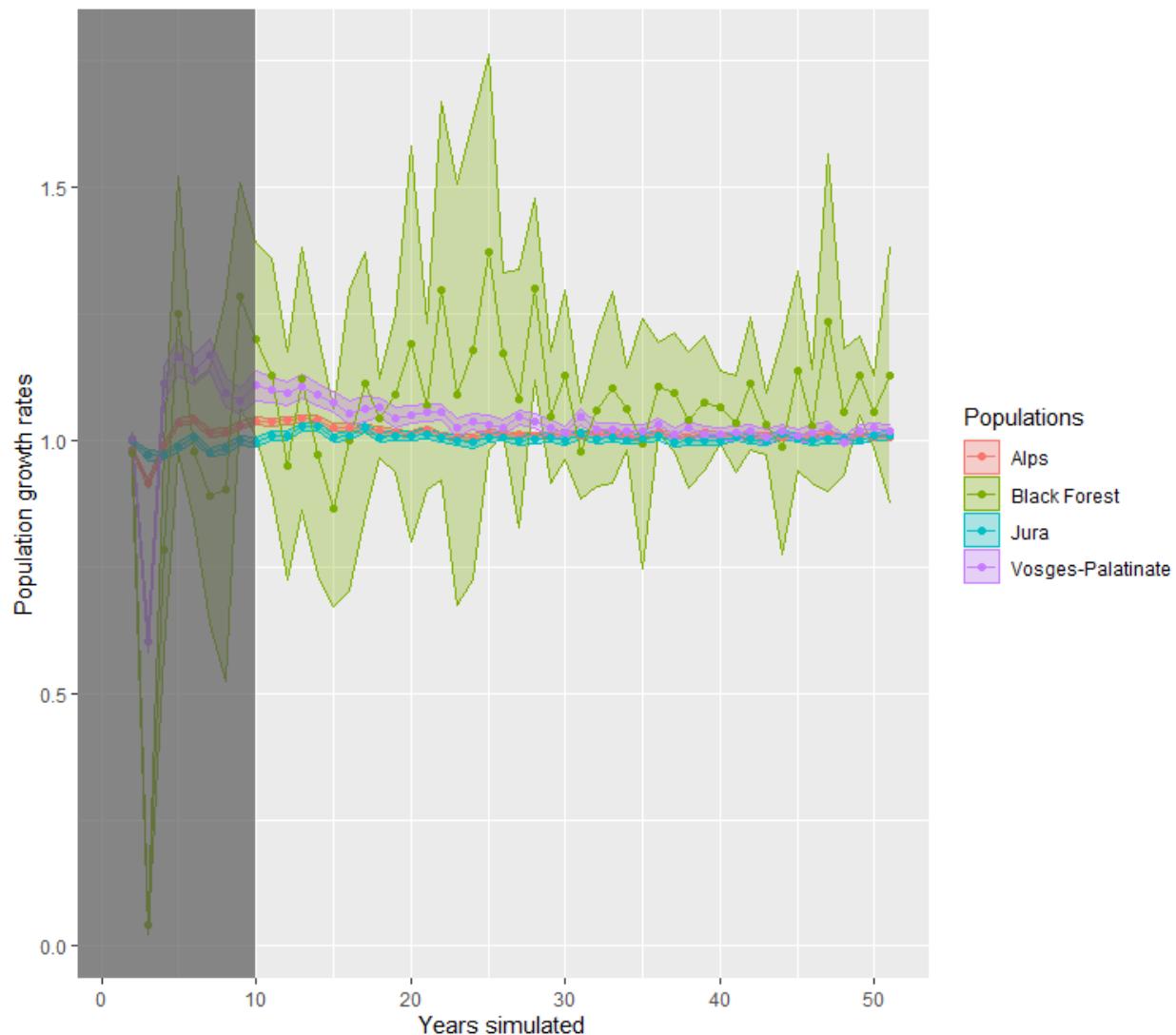
213 **Results**

214

215 *Population growth rates*

216 Simulations predicted similar growth rate patterns for the Alpine, the Jura and the Vosges-
217 Palatinian populations, with a growth rate above 1 (i.e., growing phase) slowly decreasing
218 towards reaching 1 (i.e., stabilization phase). The Alpine and Jura populations had very similar
219 patterns with their maximum growth rates equal to 1.04 ($sd = 0.06$) and 1.03 ($sd = 0.07$) at 13th
220 and 14th year of simulation respectively. They both quickly reached a stabilization phase and
221 fluctuated a little over the final time span of the simulation. The Vosges-Palatinian population
222 had the highest growth rate, equal to 1.11 ($sd = 0.21$), in the 10th year of the simulation. This
223 population stabilized later than the Alpine and Jura populations. The Black Forest population had

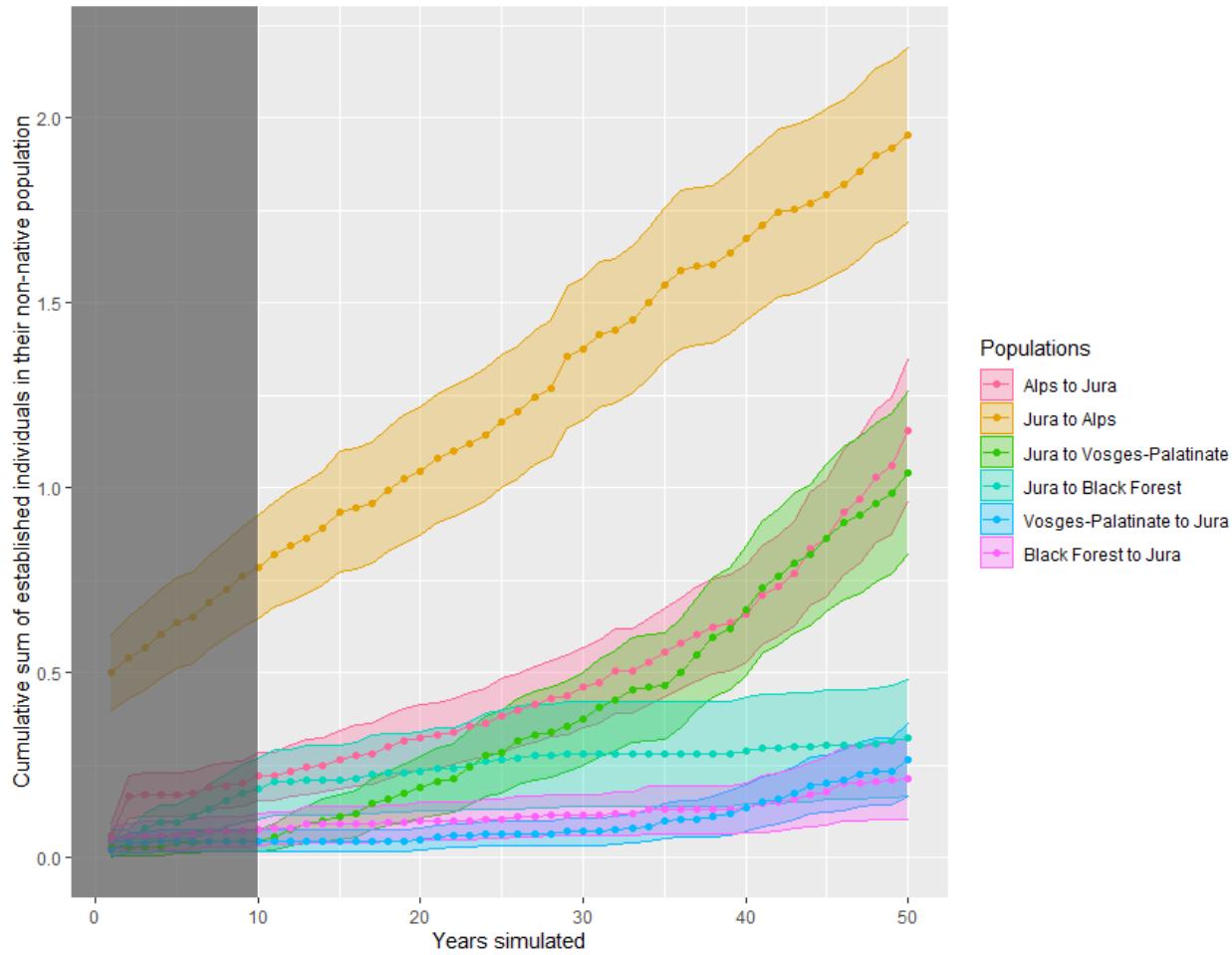
224 a more fluctuating growth rate over the simulation. It reached a minimum of 0.87 ($sd = 0.49$) at
225 the 15th year of simulation and a maximum of 1.37 ($sd = 0.62$) at the 25th year of simulation;
226 confidence intervals around mean growth rates were large and much larger than in other
227 populations.



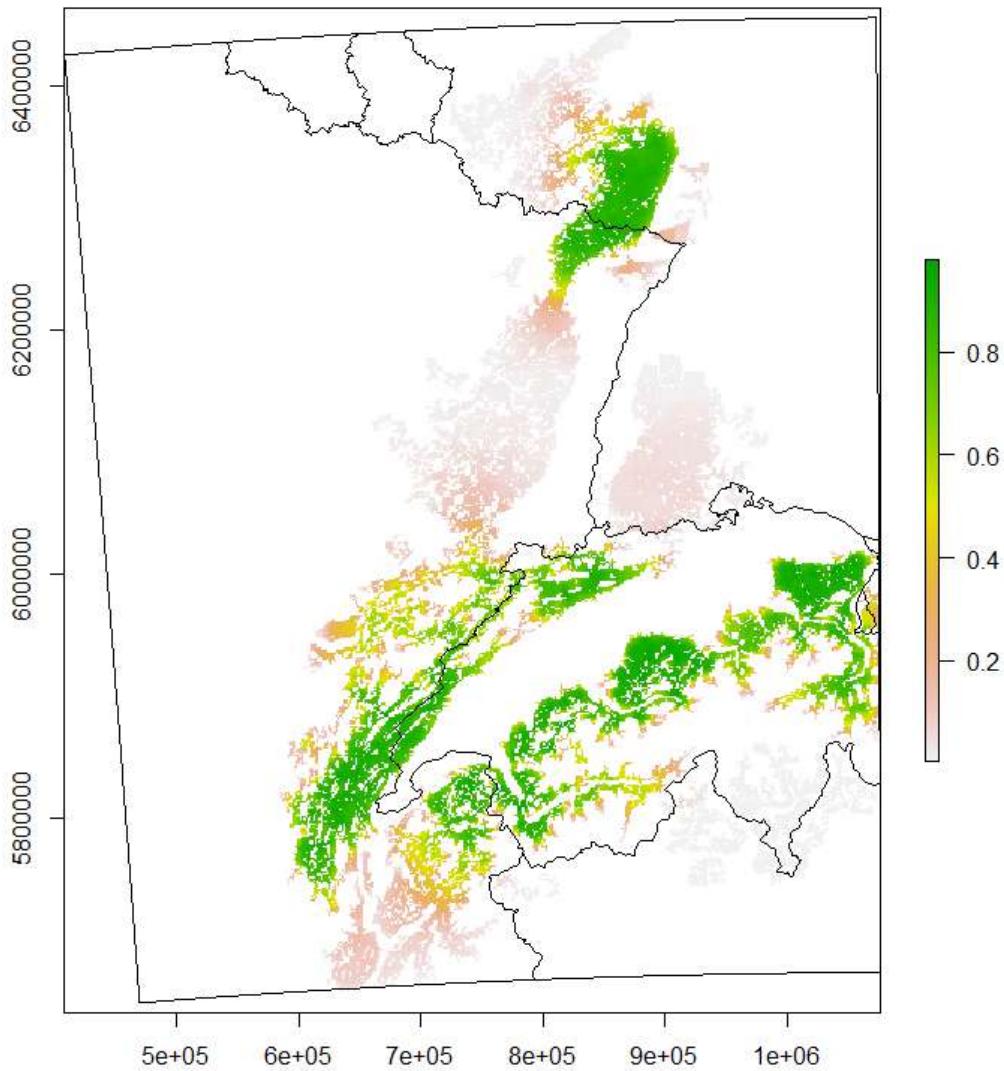
228
229 **Figure 2:** Annual rates of increase over the simulated years for each population. The grey area
230 represents the 10-year burn-in phase. Points are mean over 200 replicates and envelopes are 95%
231 confidence intervals from 200 replicates.
232

233 *Lynx establishments outside their native populations*

234 The cumulative number of lynx establishments in a population area different from their native
235 one showed that the Jura population is at the center of lynx movements between populations. The
236 most important movement was for individuals born in the Jura population going to established
237 themselves in the Alpine population. After 50 years, the Jura population had, on average across
238 all replicates, 2.0 individuals ($sd = 1.7$) leaving to establish themselves in the Alpine population
239 over the whole simulated period, 1.0 individuals ($sd = 1.6$) leaving to establish themselves in the
240 Vosges-Palatinian population, and 0.3 individuals ($sd = 1.1$) leaving to establish themselves in
241 the Black Forest. The Alpine population showed a movement of 1.2 individuals on average ($sd =$
242 1.4) leaving to establish themselves in the Jura population over the simulated period of 50 years.
243 There were only a few movements from the Vosges-Palatinian (0.3 individuals on average, $sd =$
244 0.7) or from the Black Forest (0.2 individuals on average, $sd = 0.8$) populations towards the Jura
245 to establish. There were no exchange of individuals simulated between the Alpine, the Vosges-
246 Palatinian and the Black Forest populations.



258 replicates. Most of the area that sustained territories had a mean territory occupancy of over 0.8
259 (maximum value for the Alpine population = 0.98, maximum value for the Jura population =
260 0.97). There were very contrasted values in predicted female territories for the Vosges-Palatinian
261 population (mean = 0.23, sd = 0.33). Female territories were established with a very high
262 frequency of occurrence across the replicates in the Palatinate Forest in Germany (maximum
263 value = 0.94), whereas territories were established less frequently in the southern part of the
264 Vosges Mountains in France. Finally, mean territory occupancy was the lowest for the Black
265 Forest population (mean = 0.03, sd = 0.02, maximum value = 0.09).



267 **Figure 4:** Occupancy by female territories over the study area at the last year of simulation.
268 Values between 0 and 1 are mean occupancy probability per cell of 1 km² over 200 replicates
269 (e.g., cell with value equal to 1 were always occupied in all simulation replicates).

270

271

272 **Discussion**

273

274 *The well-established Alpine and Jura populations*

275 The model predicted a steady growth of Alpine and Jura populations quickly reaching a
276 stabilization phase indicating that they may soon be at carrying capacity. However, carrying
277 capacity could be higher than what we found in our simulations, depending on the strength of
278 density-dependence processes (Zimmermann et al., 2007). Although we assumed that the number
279 of individuals an area can support is mainly defined by female territory size, our model does not
280 include a relationship between lynx behavior and density. Yet, studies found that lynx density
281 also influences home range sizes (Pesenti and Zimmermann, 2013), and differently for females
282 and males (Aronsson et al., 2016). For instance, in the North-Western Swiss Alps, lynx territories
283 were much larger in the 80s when lynx density was lower compared to the 90s (Breitenmoser-
284 Würsten et al., 2001). The Alpine and Jura areas could therefore support more individuals if
285 density-dependent mechanisms occur.

286

287 *The Jura population as the crossroad of Western Europe lynx movements*

288 The Jura population was found to be the only population connected by lynx exchanges with all
289 the other populations. However, individual exchanges were estimated very low, with only a few
290 individuals moving from their native population to establish their territory in another one other

291 over the 50 years. In Switzerland, only a few lynx movements between the Alpine and Jura
292 populations have been observed until now despite a large camera trapping monitoring. These two
293 populations also differ genetically suggesting very few exchange between them (Breitenmoser-
294 Würsten and Obexer-Ruff, 2003). When inspecting model output maps (Fig. 4), individuals are
295 contained in the Swiss Alps, restricted to an area of good habitat almost totally surrounded by
296 less favorable habitats (Appendix A, Fig. A.3). However, individuals have recently started to
297 settle permanently on the Swiss Plateau (between Alps and the Jura Mountains) predicted with
298 less favorable habitats and some have even reproduced successfully (F. Zimmerman, personal
299 communications), indicating potential connections there between the two populations. On the
300 other hand, our model suggests connectivity between the Jura and Alpine populations on the
301 French side with a continuity of a few forested corridors until the Chartreuse Mountains in the
302 Alps (Zimmermann and Breitenmoser, 2007). Many observations were made via camera traps of
303 lynx moving between the southern part of the Jura population and the Chartreuse Mountains
304 (Bailly, 2021). However, movement barriers (e.g., highways) may prevent connections with the
305 rest of the Alpine populations in Switzerland.

306 Lynx movements from the Jura to establish within the Vosges-Palatinian population may
307 be possible but rare (one case on average simulated over 50 years). This is coherent with field
308 monitoring that highlighted until now the presence of only a male in the south of the Vosges
309 Mountains coming from the Jura Mountains during the winter 2014-2015 (Chenesseau and
310 Briaudet, 2016; Hurstel and Laurent, 2016). Connectivity between these two populations remains
311 far from optimal because of multiple barriers (e.g., highways, railroads and rivers) that impede
312 lynx dispersal between the two mountain ranges and increase collision risk (Morand, 2016;
313 Zimmerman and Breitenmoser, 2007).

314 Regarding the Black Forest, six males are known to have immigrated from the Swiss side
315 of the Jura population since 2013 (unpublished data, Forest Research Institute Baden-
316 Württemberg; (Mitarbeitende der Stiftung KORA, 2017) as well as two males from the
317 Northeastern Alps (Drouet-Hoguet et al., 2021). Simulated lynx movements towards the Black
318 Forest seem therefore largely under-estimated in our model, probably because we only accounted
319 for individuals who successfully established. Dispersal of individuals from the Jura or the Alps
320 towards the Black Forest area may have been simulated but if individuals did not establish
321 successfully, they were not recorded. Moreover, male establishment is driven by female presence
322 in our model, and because the Black Forest population did not have any female, new males
323 arriving could not establish and were doomed to die while searching for females. A more realistic
324 rule for male establishment would be to let them search for females but still allow them to settle
325 after a defined period of time, even without females. It happens quite regularly that males show
326 territorial behavior even without females (M. Herdtfelder, pers. comm.).

327

328 *The increasing Vosges-Palatinian population*

329 Projections for the Vosges-Palatinian population showed a growth over the next 50 years.
330 However, there was a difference between the northern part of the population range (Northern
331 Vosges in France and Palatinate Forest in Germany) predicted with high resident female
332 occupancy compared to the low occupancy predicted from Central to Southern Vosges. The lynx
333 reintroduction program in the Palatinate Forest conducted since 2016 and the arrival of new
334 individuals colonizing the Northern Vosges and regions more to the south (Schwoerer 2021 ;
335 Scheid et al. 2021) are currently one of the main inputs. Lynx abundance was initially a bit higher
336 in this smaller part of the Vosges-Palatinian population (i.e., 11 individuals in the Palatinate
337 Forest compared to 8.4 individuals on average in the Vosges Mountains in France). The habitat

338 quality in the Vosges Mountains and the Palatinate Forest appears favorable for lynx
339 establishment (Appendix A, Fig. A.3). However, the lack of functional connectivity between the
340 Jura and the Vosges-Palatinian populations on one hand, and within the Vosges Mountains on the
341 other hand, may explain the difficulty for lynx to colonize the Vosges Mountains elsewhere than
342 in the Northern Vosges from the Palatinate Forest. Indeed, lynx movements between Jura and
343 Vosges-Palatinian populations are possible, but so far very scarce. In the same way, functional
344 connectivity between the Northern Vosges and the rest of the area may also be altered by
345 anthropogenic barriers, for example at the *Col de Saverne* where this forest bottleneck is
346 fragmented by both a highway and high-speed railway (Klar et al., 2006; Morand, 2016; Scheid
347 et al., 2021). However, movement is possible as lynx from the Palatinate Forest are known to
348 have crossed this pass, some even going back and forth (Idelberger et al., 2021; Scheid et al.,
349 2021). Lynx reintroduced in the Palatinate Forest could therefore reinforce the Vosges Mountains
350 part of the population if functional connectivity would allow it.

351 Because our model does not include human attitudes towards the species, we warn against
352 its blind use to assess the effect of reinforcement on lynx long-term persistence without
353 accounting for the human dimension component. Illegal killings, as they occurred after the 90's
354 reintroduction program in this area (Vandel et al., 2006) as well as more recent ones (Germain,
355 2020) may be an additional mortality that the model does not account for. The extent of
356 acceptance towards species reinforcement from some local stakeholders is an important element
357 (Charbonnel and Germain, 2020). In this case, we recommend that our model be extended to
358 include the dynamics of the whole socio-ecosystem (Behr et al., 2017; Guerrero et al., 2018).

359

360 *The isolated Black Forest*

361 Growth rates were very heterogeneous along the simulated time period and confidence intervals
362 around the mean were large for this population. This is due to the demographic stochasticity
363 which impacted the Black Forest population a lot because of its small size compared to other
364 populations. The model simulated only a few lynx movements from the Jura population to the
365 Black Forest which did not contribute much to population growth and female established with a
366 very low rate after 50 years. These results tend to show that the Black Forest population is
367 unlikely to be soon recolonized by lynx, especially considering that observed individuals are only
368 males (Drouet-Hoguet et al., 2021; Port et al., 2021). For instance, no female lynx has been
369 observed until now crossing the Rhine valley that separates the Black Forest from their
370 neighboring populations probably due to their risk-shy nature compared to male (Port et al.,
371 2021). Using IMBs, Herdtfelder (2012) suggested that population reinforcement with lynx
372 females might be the solution considering that habitat is of good quality in this area. Again, if our
373 model was to be used to assess this strategy, it would need to incorporate human dimensions.

374

375 *Model limitations*

376 Although model predictions passed the validation step (Appendix C), several aspects of our IBM
377 could still be improved. The habitat layer is defined in categories with strict “barriers” that the
378 simulated lynx cannot cross whereas the species may be tolerant of human activities (Basille et
379 al., 2009; Bouyer et al., 2015). Lynx may live near urban areas and cross lakes (F. Zimmermann,
380 pers. comm.). In that context, the habitat layer could be improved by being defined as a
381 continuous variable representing a degree of preference or permeability of the landscape to avoid
382 prohibiting the movement through certain landscape elements. The habitat layer could also be
383 improved by accounting for roads and their associated structures as movement barriers (e.g.,
384 highways difficult to cross, over-pass facilitating the movement) instead of only mortality sources

385 (Klar et al., 2006; Marchand et al., 2017). In our model, lynx movement is not impeded by roads.
386 The inclusion of permeability of these linear barriers to the lynx movements may help to refine
387 the behavior rules (Marchand et al., 2017). We could also redefine the movement behavior rules
388 to be sex or age-dependent. Indeed, females seem more conservative (i.e., disperse close to their
389 natal range) compared to males and some males are able to disperse over long distances (Port et
390 al., 2021).

391

392 *Perspectives for assessing lynx conservation strategies*

393 Our model used to evaluate lynx population persistence could be used to better understand
394 aspects of lynx conservation that we did not include yet, such as illegal killings (Heurich et al.,
395 2018). Moreover, thanks to its individual-based structure, a genetic component could also be
396 included to track relatedness between individuals and allow studying inbreeding risk and Allee
397 effects (Premier et al., 2020). Our model could also be used to test the effect of different
398 scenarios, either by modifying the lynx populations (e.g., illegal killings, reintroduction
399 programs) or the landscape (e.g., green bridges or roads construction) and assess the potential
400 benefits or negative effects on lynx population persistence. Modifications of road networks to
401 improve connectivity, such as the removal of road segments or the addition of overpass (i.e.,
402 green bridges), could be tested. Then, their effect could be included through a new layer of
403 collision probabilities and the population persistence calculated accordingly. Similarly, other
404 modifications of land cover (e.g., restoring forest areas) could also be tested. This model could be
405 very useful to stakeholders working on corridors and the reduction of lynx-vehicles collisions as
406 well as reintroductions programs and species acceptance.

407

408 **Conclusion**

409 In this paper, we built and relied on a spatially-explicit individual-based model to forecast the
410 fate of lynx populations over the next 50 years. Our results suggest that exchanges of individuals
411 between populations to establish new territories were limited, and emphasize that the Jura
412 population plays the role of a Western Europe crossroad. Overall, lynx persistence in the Upper
413 Rhine meta-population and the Alpine population over the next 50 years seems likely on a large
414 scale. However, lynx persistence in the southern part of the Vosges-Palatinian population and in
415 the Black Forest appears more challenging without long-term conservation planning.

416

417 **References**

- 418 Aronsson, M., Low, M., López-Bao, J. V., Persson, J., Odden, J., Linnell, J.D.C., Andrén, H.,
419 2016. Intensity of space use reveals conditional sex-specific effects of prey and conspecific
420 density on home range size. *Ecol. Evol.* 6, 2957–2967.
- 421 Bailly, J., 2021. Le Lynx en Chartreuse - Épine - Mont du Chat : bilan du suivi photographique
422 2017-2020 réalisé d'après les données collectées dans le cadre du réseau Loup-Lynx de
423 l'OFB.
- 424 Basille, M., Herfindal, I., Santin-Janin, H., Linnell, J.D.C., Odden, J., Andersen, R., Arild Høgda,
425 K., Gaillard, J.M., 2009. What shapes Eurasian lynx distribution in human dominated
426 landscapes: selecting prey or avoiding people? *Ecography (Cop.)*. 32, 683–691.
427 <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2009.05712.x>
- 428 Behr, D.M., Ozgul, A., Cozzi, G., 2017. Combining human acceptance and habitat suitability in a
429 unified socio-ecological suitability model: a case study of the wolf in Switzerland. *J. Appl.*
430 *Ecol.* 54, 1919–1929. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12880>
- 431 Bencin, H.L., Prange, S., Rose, C., Popescu, V.D., 2019. Roadkill and space use data predict
432 vehicle-strike hotspots and mortality rates in a recovering bobcat (*Lynx rufus*) population.

- 433 Sci. Rep. 9, 15391. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-50931-5>
- 434 Bouyer, Y., Gervasi, V., Poncin, P., Beudels-Jamar, R.C., Odden, J., Linnell, J.D.C., 2015.
- 435 Tolerance to anthropogenic disturbance by a large carnivore: the case of Eurasian lynx in
- 436 south-eastern Norway. Anim. Conserv. 18, 271–278. <https://doi.org/10.1111/acv.12168>
- 437 Breitenmoser-Würsten, C., Obexer-Ruff, G., 2003. Population and conservation genetics of two
- 438 re-introduced lynx (*Lynx lynx*) populations in Switzerland – a molecular evaluation 30 years
- 439 after translocation, in: Proceedings of the 2nd Conference on the Status and Conservation of
- 440 the Alpine Lynx Population (SCALP). Amden, Switzerland, pp. 28–31.
- 441 Breitenmoser-Würsten, C., Vandel, J.-M., Zimmermann, F., Breitenmoser, U., 2007.
- 442 Demography of lynx *Lynx lynx* in the Jura Mountains. Wildlife Biol. 13, 381–392.
- 443 [https://doi.org/10.2981/0909-6396\(2007\)13](https://doi.org/10.2981/0909-6396(2007)13)
- 444 Breitenmoser-Würsten, C., Zimmermann, F., Ryser, A., Capt, S., Laass, J., Siegenthaler, A.,
- 445 Breitenmoser, U., 2001. Untersuchungen zur Luchspopulation in den Nordwestalpen der
- 446 Schweiz 1997–2000, KORA Bericht.
- 447 Breitenmoser, U., Breitenmoser-Würsten, C., Capt, S., 1998. Re-introduction and present status
- 448 of the lynx (*Lynx lynx*) in Switzerland. Hystrix 10, 17–30. <https://doi.org/10.4404/hystrix-10.1-4118>
- 450 Breitenmoser, U., Breitenmoser-Würsten, C., Okarma, H., Kaphegyi, T., Kaphygyi, U., Müller,
- 451 U.M., 2000. Action Plan for the conservation of the Eurasian Lynx (*Lynx lynx*) in Europe,
- 452 Nature and environment.
- 453 Ceia-Hasse, A., Borda-de-Águia, L., Grilo, C., Pereira, H.M., 2017. Global exposure of carnivores
- 454 to roads. Glob. Ecol. Biogeogr. 26, 592–600. <https://doi.org/10.1111/geb.12564>
- 455 Chapron, G., Kaczensky, P., Linnell, J.D.C., Von Arx, M., Huber, D., Andrén, H., López-Bao,
- 456 J.V., Adamec, M., Álvares, F., Anders, O., Balečiauskas, L., Balys, V., Bedo, P., Bego, F.,

- 457 Blanco, J.C., Breitenmoser, U., Brøseth, H., Bufka, L., Bunikyte, R., Ciucci, P., Dutsov, A.,
458 Engleder, T., Fuxjäger, C., Groff, C., Holmala, K., Hoxha, B., Iliopoulos, Y., Ionescu, O.,
459 Jeremić, J., Jerina, K., Kluth, G., Knauer, F., Kojola, I., Kos, I., Krofel, M., Kubala, J.,
460 Kunovac, S., Kusak, J., Kutil, M., Liberg, O., Majić, A., Männil, P., Manz, R., Marboutin,
461 E., Marucco, F., Melovski, D., Mersini, K., Mertzanis, Y., Myslajek, R.W., Nowak, S.,
462 Odden, J., Ozolins, J., Palomero, G., Paunović, M., Persson, J., Potoečník, H., Quenette,
463 P.Y., Rauer, G., Reinhardt, I., Rigg, R., Ryser, A., Salvatori, V., Skrbinšek, T., Stojanov, A.,
464 Swenson, J.E., Szemethy, L., Trajče, A., Tsingarska-Sedefcheva, E., Váňa, M., Veeroja, R.,
465 Wabakken, P., Wölfl, M., Wölfl, S., Zimmermann, F., Zlatanova, D., Boitani, L., 2014.
466 Recovery of large carnivores in Europe's modern human-dominated landscapes. *Science*
467 (80-.). 346, 1517–1519. <https://doi.org/10.1126/science.1257553>
- 468 Charbonnel, A., Germain, E., 2020. Plan Régional d'Actions en faveur du Lynx boréal (*Lynx*
469 *lynx*) dans le Massif des Vosges : rétablir le Lynx dans un état de conservation favorable
470 dans le cadre d'une démarche participative, concertée et partagée avec les acteurs du
471 territoire. Lucy (57), France.
- 472 Chenesseau, D., Briaudet, P.-E., 2016. Destin de lynx, trombinoscope insolite de lynx identifiés
473 par piégeage photographique : Bingo ! Du massif jurassien aux Vosges, il n'y a qu'un pas...
474 de lynx. *Bull. Lynx du Réseau* 20, 9–10.
- 475 Drouet-Hoguet, N., Chenesseau, D., Kunz, F., Zimmermann, F., 2021. Situation of the Eurasian
476 lynx in the Jura Mountains. *Cat News Spec. Issue* 14, in preparation.
- 477 Germain, E., 2020. Lettre d'information n°1 du PRA en faveur du Lynx dans le Massif des
478 Vosges. Janvier-Juin 2020. Lucy (57), France.
- 479 Germain, E., Schwoerer, M.-L., 2021. Situation of the Eurasian lynx in the Vosges Mountains.
480 *Cat News Spec. Issue* 14, 34–37.

- 481 Grimm, V., Berger, U., Bastiansen, F., Eliassen, S., Ginot, V., Giske, J., Goss-Custard, J., Grand,
482 T., Heinz, S.K., Huse, G., Huth, A., Jepsen, J.U., Jørgensen, C., Mooij, W.M., Müller, B.,
483 Pe'er, G., Piou, C., Railsback, S.F., Robbins, A.M., Robbins, M.M., Rossmanith, E., Rüger,
484 N., Strand, E., Souissi, S., Stillman, R.A., Vabø, R., Visser, U., DeAngelis, D.L., 2006. A
485 standard protocol for describing individual-based and agent-based models. *Ecol. Modell.*
486 198, 115–126. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.04.023>
- 487 Grimm, V., Berger, U., DeAngelis, D.L., Polhill, J.G., Giske, J., Railsback, S.F., 2010. The ODD
488 protocol: A review and first update. *Ecol. Modell.* 221, 2760–2768.
489 <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.08.019>
- 490 Guerrero, A.M., Bennett, N.J., Wilson, K.A., Carter, N., Gill, D., Mills, M., Ives, C.D., Selinske,
491 M.J., Larrosa, C., Bekessy, S., Januchowski-Hartley, F.A., Travers, H., Wyborn, C.A.,
492 Nuno, A., 2018. Achieving the promise of integration in social-ecological research: a review
493 and prospectus. *Ecol. Soc.* 23, 38. <https://doi.org/10.5751/ES-10232-230338>
- 494 Herdtfelder, M., Schraml, U., Suchant, R., 2021. Steps towards a lynx population in the Black
495 Forest? *Cat News Spec. Issue* 14, 45–46.
- 496 Heurich, M., Schultze-naumburg, J., Piacenza, N., Magg, N., Čeverny, J., Engleeder, T.,
497 Herdtfelder, M., Sladova, M., Kramer-Schadt, S., 2018. Illegal hunting as a major driver of
498 the source-sink dynamics of a reintroduced lynx population in Central Europe. *Biol.*
499 *Conserv.* 224, 355–365. <https://doi.org/S0006320717314003>
- 500 Hradsky, B.A., Kelly, L.T., Robley, A., Wintle, B.A., 2019. FoxNet: An individual-based model
501 framework to support management of an invasive predator, the red fox. *J. Appl. Ecol.* 56,
502 1460–1470. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13374>
- 503 Hurstel, A., Laurent, A., 2016. Première preuve de dispersion du lynx d'Eurasie (*Lynx lynx*) du
504 Jura vers les Vosges. *Ciconia* 40, 1–6.

- 505 Idelberger, S., Back, M., Ohm, J., Prüssing, A., Sandrini, J., Huckschlag, D., Krebühl, K., 2021.
506 Reintroduction of Lynx in the Palatinate Forest Biosphere Reserve, Germany. Cat News
507 Spec. Issue 14, 38–42.
- 508 Klar, N., Hermann, M., Kramer-Schadt, S., 2006. Effects of roads on a founder population of
509 lynx in the biosphere reserve “Pfalzerwald-Vosges du Nord.” Naturschutz und
510 Landschaftsplan. 38, 330–337.
- 511 Kramer-Schadt, S., Kaiser, T.S., Frank, K., Wiegand, T., 2011. Analyzing the effect of stepping
512 stones on target patch colonisation in structured landscapes for Eurasian lynx. Landsc. Ecol.
513 26, 501–513. <https://doi.org/10.1007/s10980-011-9576-4>
- 514 Kramer-Schadt, S., Revilla, E., Wiegand, T., 2005. Lynx reintroductions in fragmented
515 landscapes of Germany: Projects with a future or misunderstood wildlife conservation? Biol.
516 Conserv. 125, 169–182. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2005.02.015>
- 517 Kramer-Schadt, S., Revilla, E., Wiegand, T., Breitenmoser, U., 2004. Fragmented landscapes,
518 road mortality and patch connectivity: modelling influences on the dispersal of Eurasian
519 lynx. J. Appl. Ecol. 41, 711–723.
- 520 Marchand, P., Garel, M., Bourgoin, G., Duparc, A., Dubray, D., Maillard, D., Loison, A., 2017.
521 Combining familiarity and landscape features helps break down the barriers between
522 movements and home ranges in a non-territorial large herbivore. J. Anim. Ecol. 86, 371–
523 383. <https://doi.org/10.1111/1365-2656.12616>
- 524 Marucco, F., McIntire, E.J.B., 2010. Predicting spatio-temporal recolonization of large carnivore
525 populations and livestock depredation risk: wolves in the Italian Alps. J. Appl. Ecol. 47,
526 789–798. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2010.01831.x>
- 527 Mitarbeitende der Stiftung KORA, 2017. KORA Jahresbericht 2017. Muri.
- 528 Molinari-Jobin, A., Breitenmoser, U., Breitenmoser-Würsten, C., Cerne, R., Drouet-Hoguet, N.,

- 529 Fuxjäger, C., Zimmermann, F., 2021. SCALP: Monitoring the Eurasian lynx in the Alps and
530 beyond. *Cat News Spec.* Issue 14, 50–52.
- 531 Morand, A., 2016. Le Lynx : risques routiers et mesures correctrices – état des lieux et
532 recommandations.
- 533 Ovenden, T.S., Palmer, S.C.F., Travis, J.M.J., Healey, J.R., 2019. Improving reintroduction
534 success in large carnivores through individual-based modelling: How to reintroduce
535 Eurasian lynx (*Lynx lynx*) to Scotland. *Biol. Conserv.* 234, 140–153.
536 <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.03.035>
- 537 Pesenti, E., Zimmermann, F., 2013. Density estimations of the Eurasian lynx (*Lynx lynx*) in the
538 Swiss Alps. *J. Mammal.* 94, 73–81. <https://doi.org/10.1644/11-MAMM-A-322.1>
- 539 Philips, I., 2020. An agent based model to estimate lynx dispersal if re-introduced to Scotland.
540 *Appl. Spat. Anal. Policy* 13, 161–185. <https://doi.org/10.1007/s12061-019-09297-4>
- 541 Port, M., Henkelmann, A., Schröder, F., Waltert, M., Middelhoff, L., Anders, O., Jokisch, S.,
542 2021. Rise and fall of a Eurasian lynx (*Lynx lynx*) stepping-stone population in central
543 Germany. *Mammal Res.* 66, 45–55. <https://doi.org/10.1007/s13364-020-00527-6>
- 544 Premier, J., Fickel, J., Heurich, M., Kramer-Schadt, S., 2020. The boon and bane of boldness:
545 movement syndrome as saviour and sink for population genetic diversity. *Mov. Ecol.* 8, 1–
546 17. <https://doi.org/10.1186/s40462-020-00204-y>
- 547 Railsback, S.F., Grimm, V., 2012. Agent-based and individual-based modeling: a practical
548 introduction. Princeton University Press, Princeton, NJ.
- 549 Schadt, S., Revilla, E., Wiegand, T., Knauer, F., Kaczensky, P., Breitenmoser, U., Bufka, L.,
550 Cerveny, J., Koubek, P., Huber, T., Stanisa, C., Trepl, L., 2002. Assessing the suitability of
551 central European landscapes for the reintroduction of Eurasian lynx. *J. Appl. Ecol.* 39, 189–
552 203.

- 553 Scheid, C., Germain, E., Schwoerer, M.-L., 2021. Les Lynx (*Lynx lynx*) du Pfälzerwald
554 s'installent progressivement dans le Massif des Vosges. Ann. Sci. Rés. Bios. Trans. Vosges
555 du Nord. 20, 104–125.
- 556 Schwoerer, M.-L., 2021. Axe 3 : Suivi et conservation du Lynx, Action 10 / Bilan 2019-2020 du
557 suivi conduit par le Réseau Loup-Lynx. PRA Lynx Massif des Vosges, Lett. d'information
558 n° 7–14.
- 559 Vandel, J.-M., Stahl, P., 2005. Distribution trend of the Eurasian lynx *Lynx lynx* populations in
560 France. *Mammalia* 69, 145–158. <https://doi.org/10.1515/mamm.2005.013>
- 561 Vandel, J.-M., Stahl, P., Herrenschmidt, V., Marboutin, E., 2006. Reintroduction of the lynx into
562 the Vosges mountain massif: From animal survival and movements to population
563 development. *Biol. Conserv.* 131, 370–385. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2006.02.012>
- 564 von Arx, M., 2020. *Lynx lynx* (amended version of 2018 assessment).
- 565 Wölfl, S., Anders, O., Middelhoff, T.L., Hohmann, U., Back, M., Idelberger, S., Krebühl, J.,
566 Ohm, J., Prüssing, A., Herdtfelder, M., Böcker, F., Erretkamps, J., Kopaniak, L., Wölfl, M.,
567 Jokisch, S., Hucht-Ciorga, I., Teubner, J., Trost, M., Zschille, J., Jeß, E., Steinberg, C., 2021.
568 Status des Luchses in Deutschland. *Natur und Landschaft* 96.
- 569 Zimmermann, F., Breitenmoser-Würsten, C., Breitenmoser, U., 2007. Importance of dispersal for
570 the expansion of a Eurasian lynx *Lynx lynx* population in a fragmented landscape. *Oryx* 41,
571 358–368. <https://doi.org/10.1017/S0030605307000712>
- 572 Zimmermann, F., Breitenmoser, U., 2007. Potential distribution and population size of the
573 Eurasian lynx *Lynx lynx* in the jura Mountains and possible corridors to adjacent ranges.
574 *Wildlife Biol.* 13, 406–416. [https://doi.org/10.2981/0909-6396\(2007\)13\[406:PDAPSO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.2981/0909-6396(2007)13[406:PDAPSO]2.0.CO;2)
- 575
- 576

577

578 **Acknowledgements**

579 We thank all the volunteers from the “Réseau Loup-Lynx” who collected data on the field. SB
580 and OG were funded by French National Research Agency (ANR-16-CE02-0007). SB was
581 funded as well by OFB and OG was funded by CNRS and the “Mission pour l’Interdisciplinarité”
582 through the “Osez l’Interdisciplinarité” initiative. CFE, Cerema and CROC were funded by
583 CIL&B, MTES (ITTECOP) and FRB through the research program ERC-Lynx. CROC was
584 funded in 2019/2020 by the European Union within the framework of the Operational Program
585 FEDER-FSE “Lorraine et Massif des Vosges 2014–2020”, the “Commissariat à l’Aménagement
586 du Massif des Vosges” for the FNADT (“Fonds National d’Aménagement et de Développement
587 du Territoire”), the DREAL Grand Est (“Direction Régionale pour l’Environnement,
588 l’Aménagement et le Logement”), the “Région Grand Est” and the “Fondation d’entreprise
589 UEM”.

590

591

1 **Appendix A – Detail of the lynx spatially-explicit individual-based model**

2

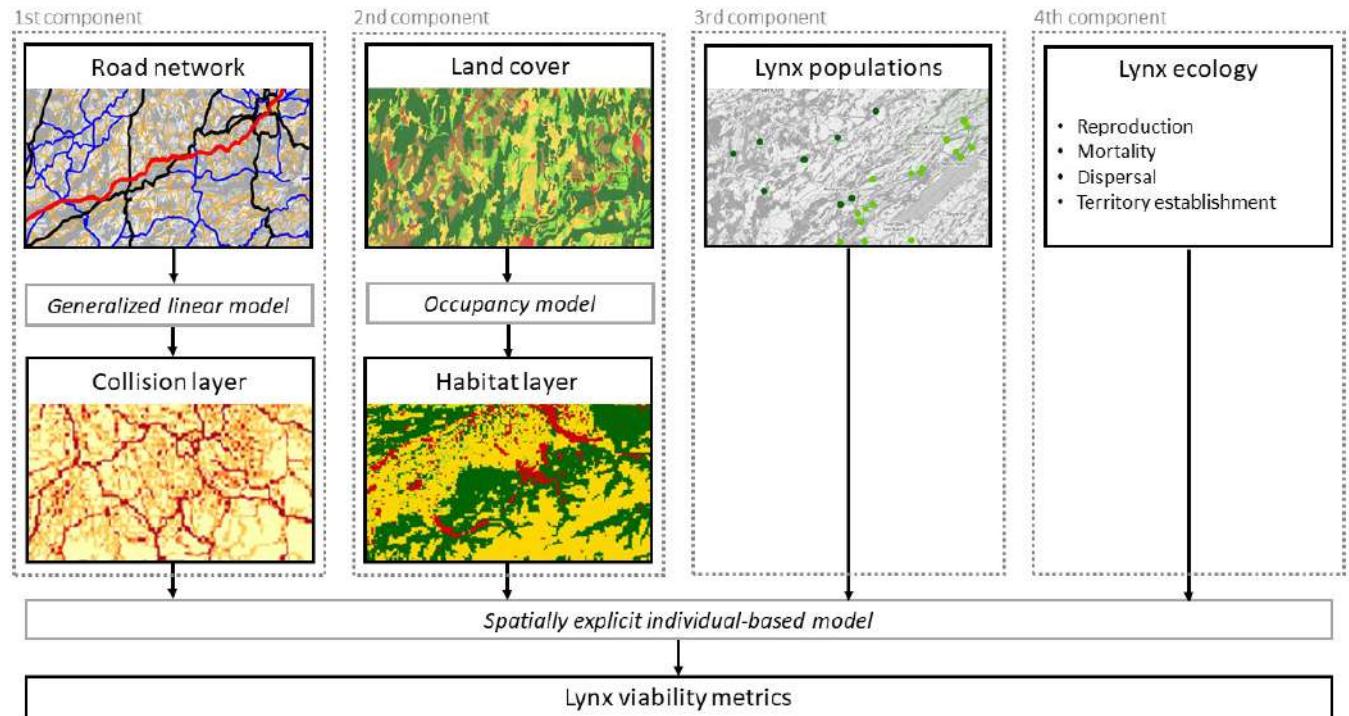
3 A complete description of the model following the Overview, Design concepts, and Details

4 (ODD) protocol (Grimm et al., 2010, 2006) is provided in Appendix B.

5

6 Our lynx spatially-explicit individual-based model is made of four components (Fig. A.1). The
7 first component represents the impact of road network on lynx survival via predicted collision
8 probabilities. The second component represents the impact of land cover on lynx space use with
9 the definition of different lynx habitat types. These first two components are spatial layers
10 influencing the behavioral rules followed by simulated lynx individuals. The third component
11 represents the initial lynx populations made of lynx individual's location and characteristics used
12 to launch the SE-IBM. The fourth component details all SE-IBM rules including lynx
13 demography, dispersal movement and establishment.

14



15

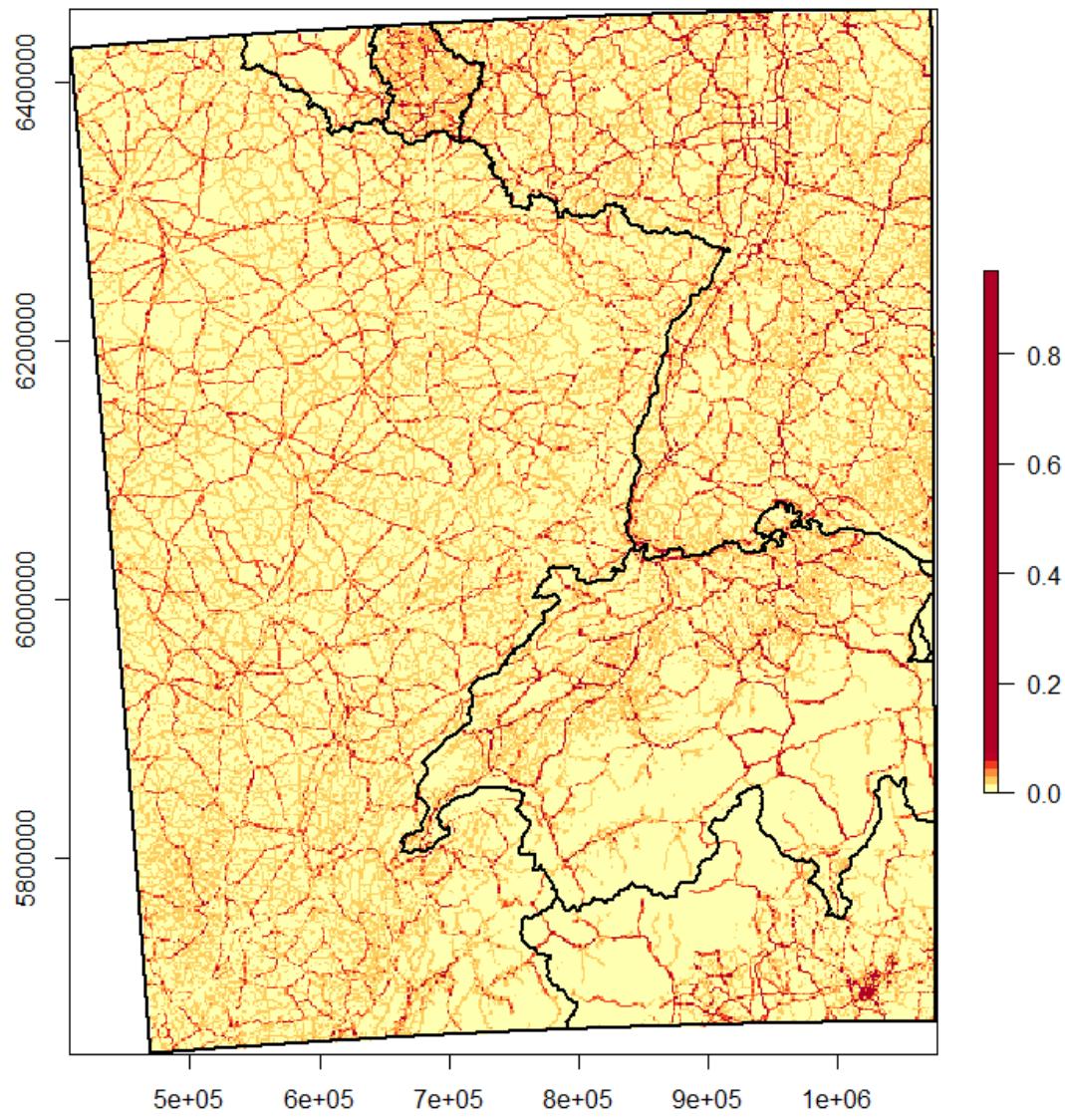
16 **Figure A.1:** The four components of the lynx SE-IBM. The first component represents the
 17 impact of road network on lynx survival through vehicle collision. A generalized linear model
 18 predicted collision probabilities (“Collision layer”, Fig. A.2). The second component represents
 19 the impact of land cover on the lynx populations. A site-occupancy model predicted lynx habitats
 20 influencing lynx movement (“Habitat layer”, Fig. A.3). The third component represents lynx
 21 populations with individuals’ locations and characteristics (Fig. A.4). The fourth component
 22 encompasses all ecological rules and SE-IBM parameters. All four components are included in
 23 the SE-IBM to simulate lynx populations and assess their persistence with different metrics.

24

25 *Impact of road network (SE-IBM 1st component)*

26 We first built a risk model to predict collision probabilities between lynx and vehicles within the
 27 1 km² resolution gridded study area. We used lynx mortality events recorded by the wolf-lynx
 28 monitoring framework implemented in France (Duchamp et al., 2012), Réseau Loup-lynx

29 https://www.loupfrance.fr/suivi-du-loup/reseau-loup-lynx/) to train a logistic regression
30 explaining lynx collisions using lynx presence and both road and environmental characteristics
31 (Visintin et al., 2018, 2017). We used the IGN route500[©] for France (IGN ROUTE 500, 2018)
32 and OpenStreetMap[©] for the other countries (Geofabrik OpenStreetMap, 2014) as data sources to
33 extract total road length per cell and the type of road of the longest road segment in each cell. We
34 classified the road segments as “highways” (i.e., “Type autoroutier” in route500[©] data,
35 “motorway”, “motorway_link”, “trunk” and “trunk_link” in OpenStreetMap data), “main road”
36 (i.e., “Liaison principale” in route500[©] data, “primary” and “primary_link” in OpenStreetMap
37 data), “secondary road” (i.e., “Liaison régionale” in route500[©] data, and “secondary” and
38 “secondary_link” in OpenStreetMap data) and “local road” (i.e., “Liaison locale” in route500[©]
39 data, “tertiary”, “tertiary_link” and “unclassified” in OpenStreetMap data). For environmental
40 characteristics, we used Corine Land Cover[©] at 100 m of resolution for all Europe (Copernicus,
41 2012) to calculate the proportion of urban area in each cell (i.e., human presence). The best
42 model identified included total road length, type of road of the longest road segment and the
43 proportion of urban area. Distance to highways and human density were also tested to explain
44 lynx-vehicles collisions but were not significant. We used this model to predict a collision
45 probability between 0 and 1 in each cell of our study area to create the “Collision layer” (Fig.
46 A.2). Lynx presence was also included as explanatory variable in the model. To predict collision
47 probabilities, we defined the lynx as present everywhere on the gridded study area because
48 simulated individuals in the SE-IBM suffer from collision probability on the cells they are
49 located. Study area grid cells without road intersecting them have a zero collision probability.
50



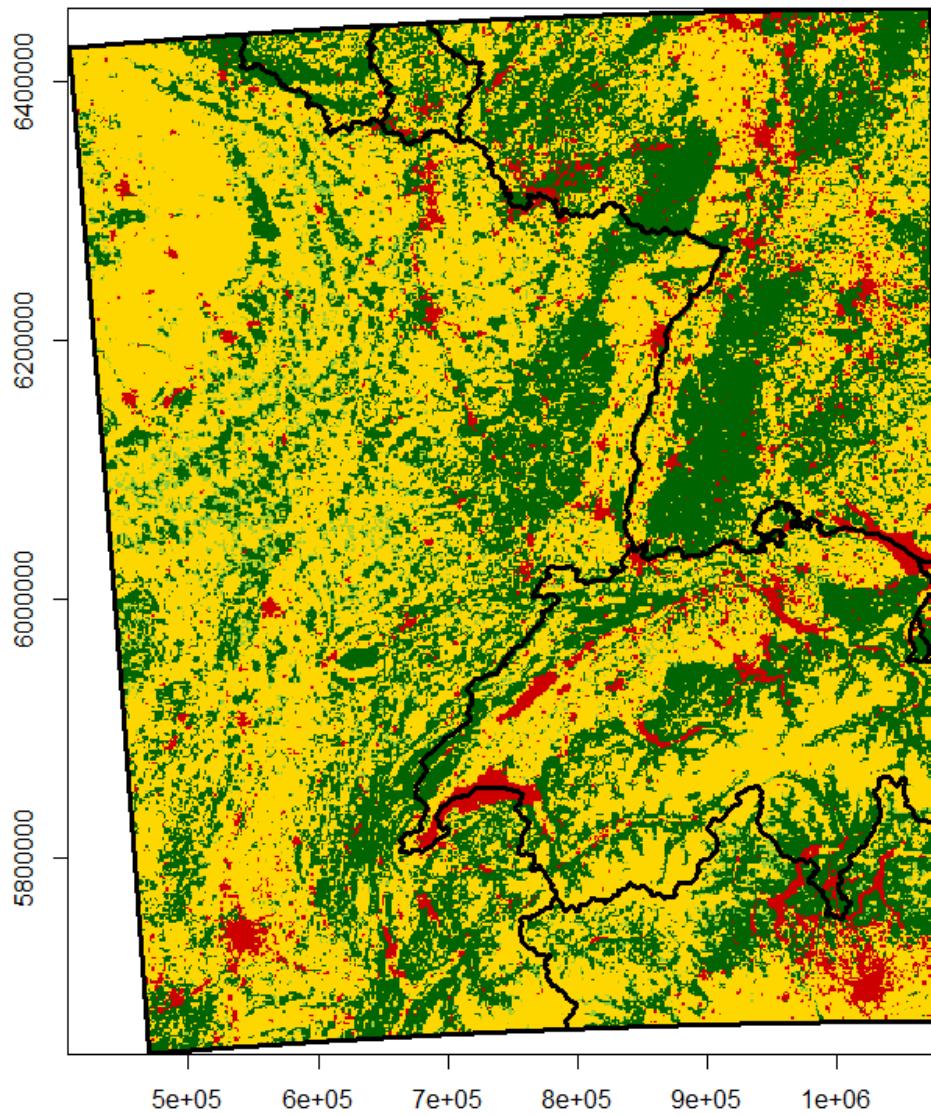
51
52 **Figure A.2:** “Collision layer” with collision probabilities between lynx and vehicles estimated
53 between 0 and 1 (yellow to red color scale). Collision probabilities are assigned to each cell of
54 the gridded landscape over the whole study area (black rectangle) used in the lynx SE-IBM using
55 the collision model. Limits of the countries (main text, Fig. 1) are overlaid in black over the map.
56

57 *Impact of land cover (SE-IBM 2nd component)*

58 We built a habitat model to define a habitat type for each cell within the 1 km² resolution gridded
59 study area. We used a multi-year occupancy model (Isaac et al., 2014; Outhwaite et al., 2018) to

60 explain regular lynx presence using land cover types important to lynx (agricultural fields, forest
61 and open land), the distance to highways (Basille et al., 2013), and human density. The model
62 was calibrated using French data for the lynx presence from 1994 to 2017 (data: Réseau Loup-
63 Lynx <https://www.loupfrance.fr/suivi-du-loup/reseau-loup-lynx/>) and then predicted over our
64 entire study area. We used Corine Land Cover[©] at 100 m of resolution for all Europe
65 (Copernicus, 2012) to calculate the proportion of agricultural and cultivated fields, forest, pasture
66 and open land in each cell. We used the IGN route500[©] for France (IGN ROUTE 500, 2018) and
67 OpenStreetMap[©] for the other countries (Geofabrik OpenStreetMap, 2014) as data sources to
68 calculate the distance from each cell center to the nearest highway. We also used IGN[©] data for
69 France (IGN ADMIN-EXPRESS-COG, 2018) and NASA[©] data for the other countries (CIESIN
70 GPWv4, 2015) to calculate the mean human density per cell. The best model identified to explain
71 lynx presence included presence of agricultural fields, forest, and open land, distance to highways
72 and human density. Shrub cover and road length were also tested to explain lynx presence but
73 were not significant. We used this model to predict lynx occupancy probability in our entire
74 gridded study area for the year 2017. We then categorized the cells to obtain a habitat layer with
75 the four habitat types defined by the habitat categorization of Kramer-Schadt et al. (2004):
76 “breeding”, “dispersal”, “matrix” and “barrier” (Fig. A.3). All cells where lynx occupancy was
77 predicted as non-null (above or equal a threshold of 0.01) were considered “breeding” habitat. All
78 forested areas not already “breeding” habitat were considered as “dispersal” habitat. Cells with
79 more than half of their surface covered by water or urban area defined by Corine Land Cover[©]
80 (Copernicus, 2012) were considered “barrier” for lynx movements. The rest was considered
81 “matrix” area (i.e., habitat not favorable for lynx but that can be traversed by dispersers). The
82 map of categorized cells for our study area defined the “Habitat layer” used in the SE-IBM (Fig.
83 A.3).

84



85

86 **Figure A.3:** “Habitat layer” with lynx habitat types as breeding habitat (dark green), dispersal
87 habitat (light green), matrix (yellow) and barrier (red). Habitat types are assigned to each cell of
88 the gridded landscape over the whole study area (black rectangle) used in the lynx SE-IBM using
89 the habitat model. Limits of the countries (main text, Fig. 1) are overlaid in black over the map.

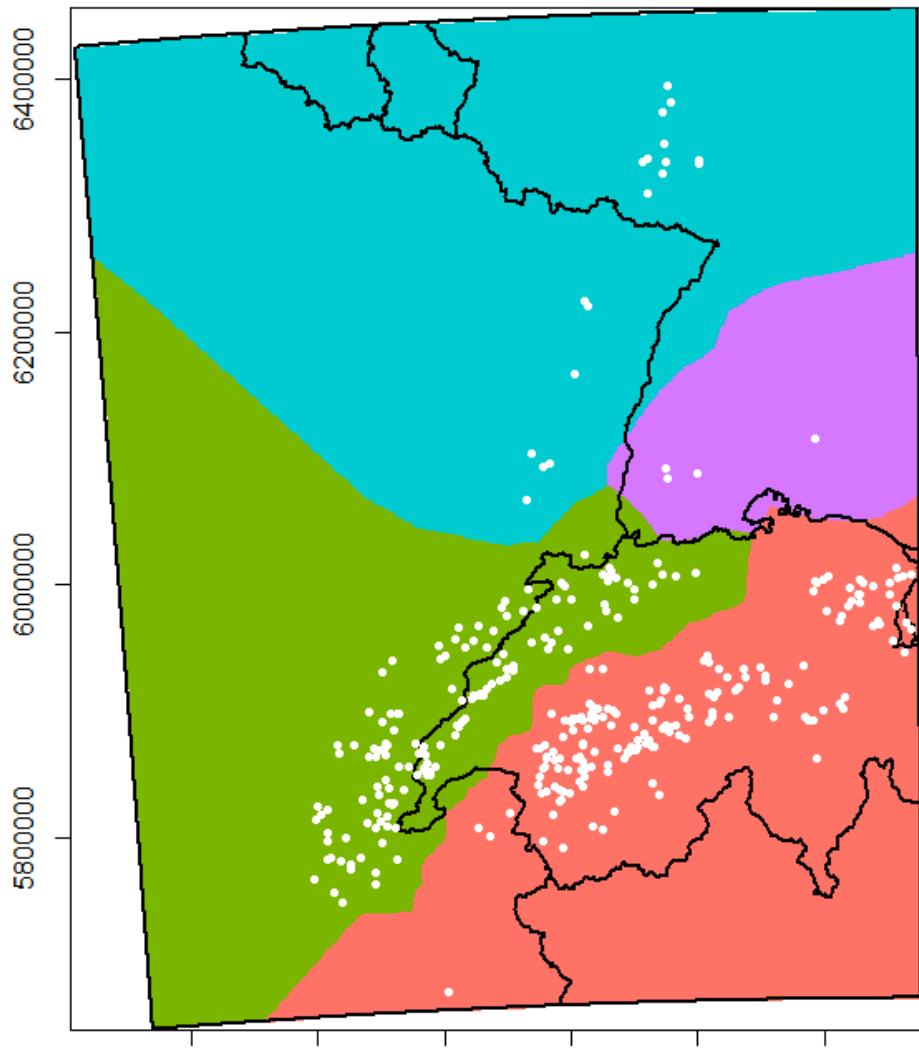
90

91 *Lynx initial populations (SE-IBM 3rd component)*

92 The initial populations to launch the SE-IBM were built with generated locations and
93 characteristics for the lynx populations using the best data available at the time of the study (Fig.
94 A.4). We used cells of regular lynx presence for France (for the time period of 01/04/2013 to
95 31/03/2017 from the Réseau Loup-Lynx, main text, Fig. 1), Switzerland (for the time period of
96 01/01/2015 to 31/12/2017 from the KORA, main text, Fig. 1) and Germany (for the time period
97 of 01/05/2017 to 30/04/2018 from the Bundesamt für Naturschutz, main text, Fig. 1). In these
98 cells, we extracted “breeding” and “dispersal” areas and sampled random lynx locations in these
99 areas to locate individuals within the different populations. In France, we used the most reliable
100 lynx density estimate (1.14 lynx per 100 km², (Gatti et al., 2014) regardless of differences in local
101 densities (Gimenez et al., 2019) to convert the area of regular presence into a number of
102 individuals to create. Ninety-two individuals were generated and dispatched over “breeding” and
103 “dispersing” areas in France: in the Vosges Mountains (500 km² of presence), in the French Jura
104 (7,700 km² of presence) and in the French Alps (500 km² of presence). A density of 1.14 lynx per
105 100 km² may be an over- or an under-estimate of the lynx density in certain areas but in the
106 absence of local density for each French population, we used this mean value. On average, this
107 method led to 4.5 individuals in the French Alps (sd = 2.1), 77.0 individuals in the French Jura
108 (sd = 3.4), and 8.4 individuals in the Vosges Mountains (sd = 2.7). In Switzerland, we generated
109 230 individuals distributed in the different areas of presence according to estimated local
110 population sizes in 2017 (data: F. Zimmermann, pers. comm.). In Germany, 11 lynx (i.e.,
111 reintroduced lynx still alive and their offspring) were identified in the Palatinate at the end of
112 April 2018 (Scheid et al., 2021) and four male lynx were identified in the Black Forest (Wölfl et
113 al., 2021). Therefore, we generated 11 lynx in Palatinate Forest and 4 lynx in the Black Forest
114 area.

115 Except for reintroduced individuals for which we knew their characteristics, we randomly
116 assigned individuals' sex (male or female) according to ratio 1:1 usually observed at birth
117 (Breitenmoser et al., 1993; Jedrzejewski et al., 1996). We also randomly assigned an age between
118 2 and 15 as lynx usually live until 15-17 years old (e.g., (Breitenmoser-Würsten et al., 2007a)).
119 Age is defined as 0 for the first year of life, 1 during the second year of life, etc. For the
120 Palatinate part of the Vosges-Palatinian population, we assigned known age and sex (5 females
121 and 6 males). In the Vosges Mountains, only males were detected in 2017 thanks to the camera
122 trap survey design implemented (Charbonnel and Germain, 2020) and no case of reproduction
123 was reported during the years preceding our analyzes. We then only defined males for the
124 individuals located in the Vosges part of the Vosges-Palatinian population, with ages randomly
125 generated. We also only defined males for the Black Forest population. All generated individuals
126 were defined as "disperser" to avoid the bias of defining territories by ourselves. They find their
127 territories on their own as defined by the SE-IBM rules.

128



129

130 **Figure A.4:** “Population layer” with the example of an initial population over the whole study
 131 area (black rectangle) used in the lynx SE-IBM using the habitat model. Limits of the countries
 132 (main text, Fig. 1) are overlaid in black over the map. Areas for the Vosges-Palatinian (blue),
 133 Black Forest (purple), Jura (green) and Alpine (red) populations were defined using the cells of
 134 lynx regular presence as in 2017-2018. Each cell of the gridded study area was assigned the
 135 population from its closest cell of lynx regular presence. White dots represent one initial
 136 population (i.e., simulated lynx released at the beginning of one simulation replicate) generated
 137 using the cells of lynx regular presence, the density or number of lynx in each population and the

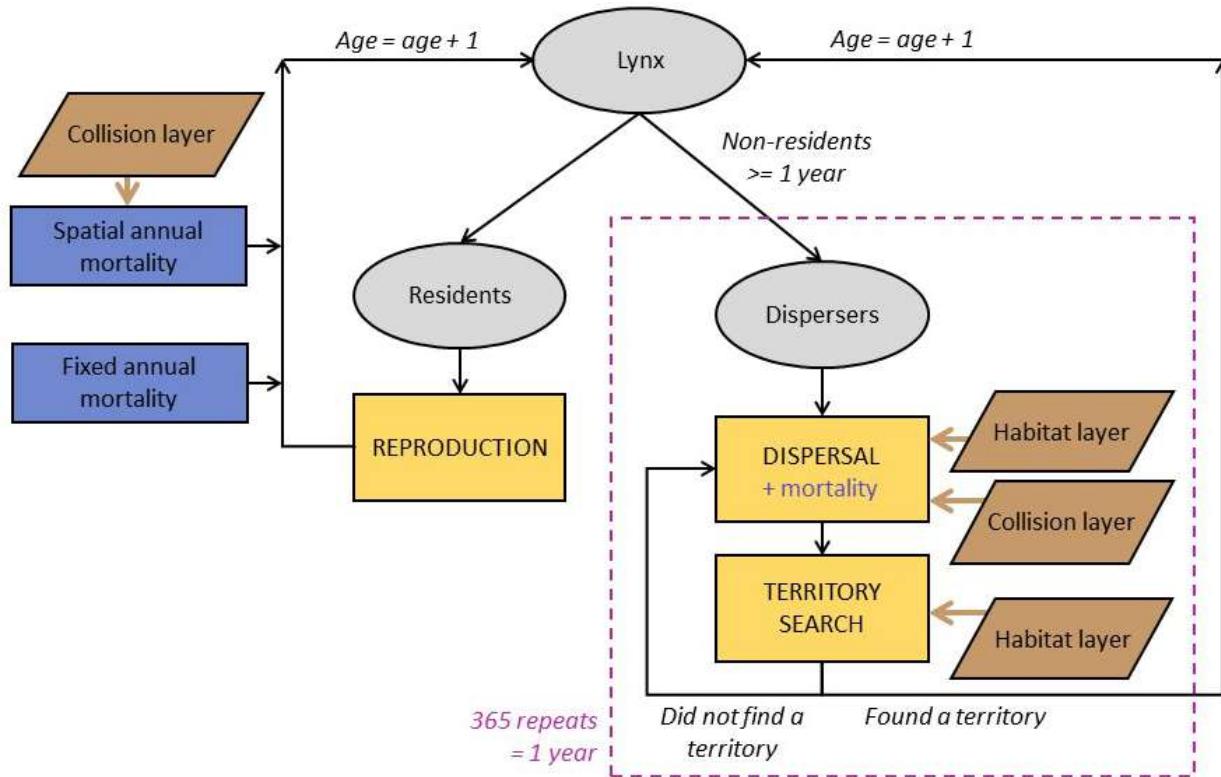
138 habitat layer to place these theoretical individuals in breeding or dispersal habitats. A different
139 initial population was used at each simulation replicate; we used the same cells of lynx regular
140 presence, the same density or number of lynx in each population and the same habitat layer, only
141 the generated locations, and chosen sex and age for unknown individuals, were different.

142

143 *SE-IBM rules according to lynx ecology (SE-IBM 4th component)*

144 Lynx individuals are simulated over a landscape represented as a grid of 1 km² resolution
145 covering the whole study area and encompassing the four lynx populations (main text, Fig. 1).
146 The gridded study area resolution corresponds to lynx's perceptual range (Haller and
147 Breitenmoser, 1986) as well as to the resolution of previous lynx IBMs (Kramer-Schadt et al.,
148 2011, 2005, 2004). Two variables characterize the gridded study area: a probability of lynx-
149 vehicle collision between 0 and 1 ("Collision layer", Fig. A.2) and a habitat type among
150 "breeding", "dispersal", "matrix", and "barrier" ("Habitat layer", Fig. A.3). Simulated individuals
151 are characterized by their "disperser" (i.e., not established on a territory and in search of one) or
152 "resident" status (i.e., established on a defined territory), their age and their sex.

153 Simulated resident individuals follow rules on a yearly time step (Fig. A.5). They do not
154 move (i.e., their movement inside their territory is not simulated), they hold a territory and they
155 may reproduce once a year. They suffer two types of annual mortality: a fixed baseline mortality
156 and a spatial one derived from the collision layer. Simulated dispersing lynx follow rules on a
157 daily time step (Fig. A.5). They do not have a territory yet and move every day along the gridded
158 study area, searching for a place to establish themselves. Their dispersal movement (Fig. A.6)
159 and search for a territory (Fig. A.7) are driven by the habitat layer. At each step individuals can
160 die from the spatial mortality derived from the collision layer, and daily from a fixed baseline
161 mortality.



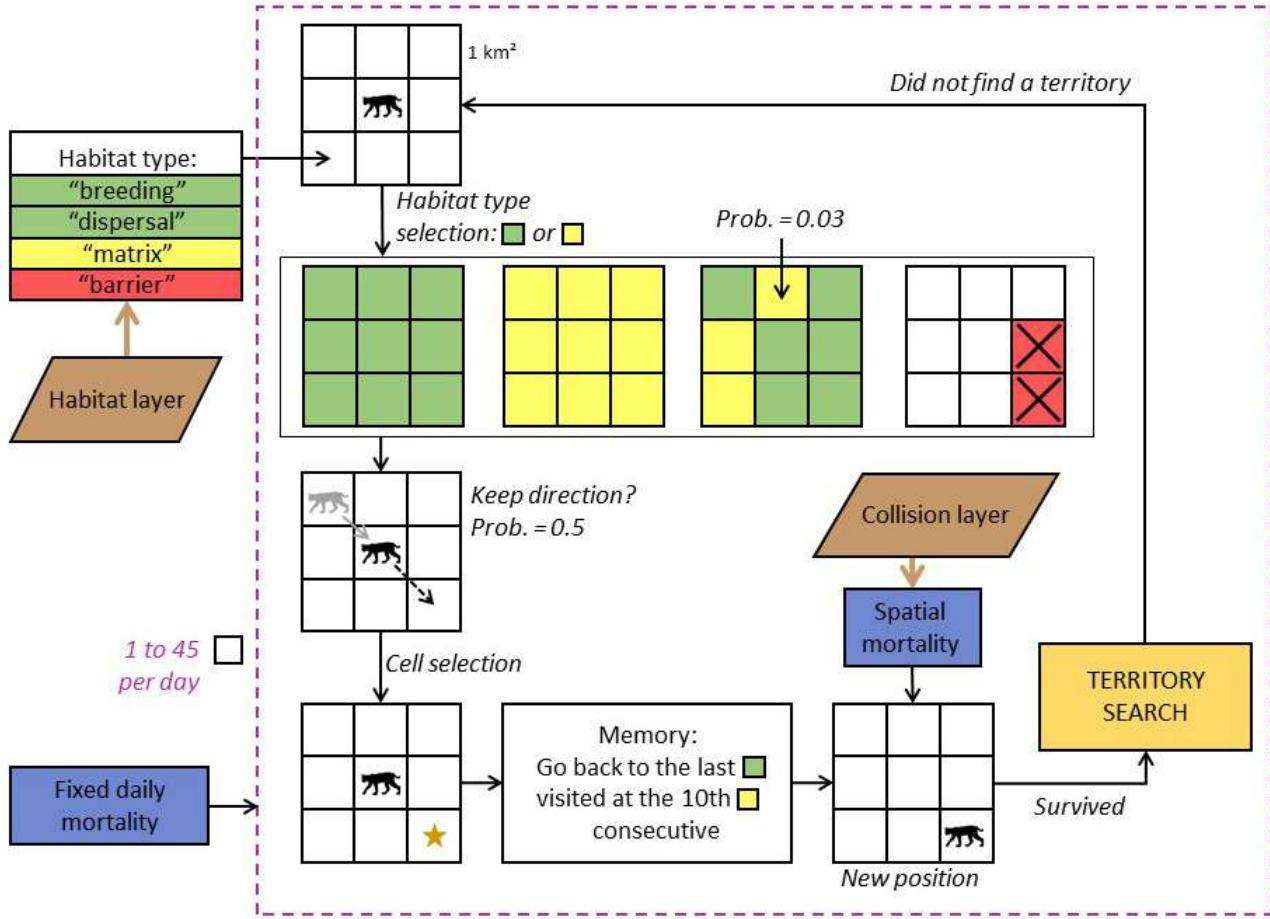
164 **Figure A.5:** Diagram of the main structure of the SE-IBM with the main events affecting both
 165 resident and dispersing simulated lynx. Grey circles represent individuals. Yellow boxes
 166 represent SE-IBM main events detailed in model description. Blue boxes and blue writing
 167 represent different mortality causes individuals suffer. Brown boxes represent environmental
 168 layers used in the SE-IBM and brown arrows point where behavioral rules are constrained by
 169 these layers. Black arrows indicate the flow of the model. Dispersers can go through dispersal
 170 and territory search every day during a year, as long as they do not find a territory (Figs. A.6 and
 171 A.7).

173 Lynx are solitary carnivores (i.e., each resident holds its own territory), except during
 174 reproduction (i.e., mating between male and female) and when females are raising their kittens

175 (Breitenmoser et al., 1993; Stahl and Vandel, 1998). Female residents reproduce with a
176 probability of 0.81 if a resident male occurs on their territory (Breitenmoser-Würsten et al.,
177 2007a; López-Bao et al., 2019). Females have 0.5 chance to be sexually mature at 1 year old, and
178 they are all sexually mature at 2 years old. Males have 0.5 chance to be sexually mature at 2 years
179 old, all being sexually mature at 3 years old (Breitenmoser-Würsten et al., 2007a; Kramer-Schadt
180 et al., 2005; Kvam, 1991). In the wild, lynx litter size averages two kittens and can be up to four
181 (Breitenmoser-Würsten et al. 2001; Lopez-Bao et al. 2019). However, around 50% of lynx kittens
182 die before reaching the age of dispersal (Breitenmoser-Würsten et al., 2001, 2007a). We
183 simulated that resident females up to 11 years old (“young” female in the SE-IBM model)
184 produce 1 or 2 kittens, with a probability of 0.5 for each litter size, that will survive until
185 becoming dispersers the following year (Henriksen et al., 2005; Kramer-Schadt et al., 2005).
186 Senescence reduces litter size, therefore “old” females in the model (12 years old and older)
187 produce 0 or 1 kitten with an equal probability of 0.5 (Henriksen et al., 2005; Kramer-Schadt et
188 al., 2005). We defined that residents die from a fixed annual mortality (i.e., baseline mortality)
189 with a probability equal to 0.1 (Breitenmoser-Würsten et al., 2007a; Heurich et al., 2018;
190 Kramer-Schadt et al., 2005), which does not include the mortality due to vehicle collisions (i.e.,
191 spatial mortality added separately with the collision model) and illegal killing (i.e., unavailable
192 estimates). We did not define an increase of mortality due to senescence but we set an age
193 maximum of 20 years (Breitenmoser-Würsten et al., 2007a; Stahl and Vandel, 1998; von Arx et
194 al., 2017). Residents can also die from a spatial annual mortality due to vehicle collisions inside
195 their territory. This spatial mortality is specific to each resident and corresponds to mean collision
196 probability inside their territory. If residents survive, they age by one year and the annual loop
197 starts again and continues as long as the simulation lasts or until they die.

198 Dispersers are individuals of 1 year old and older that do not hold a territory yet. Both
199 dispersing males and dispersing females move on the gridded study area, one cell at a time, from
200 one to 45 times per day (Fig. A.6), following the same rules. The number of steps individuals
201 move per day is sampled, each day for each disperser, from a non-linear distribution defined by
202 (Kramer-Schadt et al., 2004). Dispersers follow a correlated habitat-dependent walk in a two-step
203 process: first, they favor their habitat preferences and then, maintain their previous direction with
204 a certain probability (i.e., correlation factor, (Kramer-Schadt et al., 2004). This movement
205 process has been rigorously tested with inverse fitting, and “pattern-oriented modelling”
206 (Kramer-Schadt et al., 2007) using telemetry data of 6 dispersing lynx (5 females and one male)
207 followed in the Swiss Jura Mountains between 1988 and 1991. First, dispersers choose in which
208 habitat type they will move next. Dispersers favor “breeding” and “dispersal” habitats without
209 distinction between the two when moving and tend to avoid “matrix” habitats. By contrast, they
210 never use “barrier” habitats. The choice to move into the habitat “breeding/dispersal” or “matrix”
211 depends on the types of their 9 available cells for their next step (i.e., their 8 surrounding cells
212 plus the one they are currently on as they also can choose not to move). If the 9 cells are all of
213 one type, excluding the “barrier”, so they are either only “breeding/dispersal” (with or without
214 “barrier”) or only “matrix” (with or without “barrier”), the only available habitat type is selected.
215 If the available cells for an individual are a mix between “breeding/dispersal” and “matrix”
216 habitats (with or without “barrier”), there is a probability of 0.03 times the number of “matrix”
217 cells among the 9 ones, to choose the “matrix” habitat for the next step (Kramer-Schadt et al.,
218 2004). For example, if an individual has 3 “matrix” cells available, there is a probability of 0.09
219 that it will choose a “matrix” cell for its following location. Second, once the habitat type is
220 selected, the choice of the particular cell to move on, among the ones of the selected habitat type,
221 is given by the correlation part of the movement. Individuals follow a correlated movement with

222 a probability equal to 0.5, except for the first step of the day where there is no correlated
223 movement (Kramer-Schadt et al., 2004). If the movement is not correlated, the choice of the next
224 cell among the ones of the selected habitat type is random. If the movement is correlated, the
225 chosen cell is the one maintaining the most of the individual's current direction among the ones
226 of the selected habitat type. The chosen cell is then where the simulated lynx is moving to.
227 Dispersers try to minimize their time spent in “matrix” habitat and they can use their memory to
228 return to a previously visited “breeding/dispersal” habitat when needed. Lynx do not move more
229 than 9 cells inside “matrix” habitats, so if an individual already stepped 9 consecutive times in
230 “matrix” cells and the chosen cell for its next step is again of “matrix” type, it will use its
231 memory and return to the last “breeding/dispersal” cell visited (Kramer-Schadt et al., 2004).
232 Finally, dispersers rotate towards their chosen cell and move on their center. Once dispersers
233 move to their next cell, they may die from the spatial mortality due to vehicle collision. This
234 spatial mortality is the collision probability from the collision layer for the cell of their new
235 location. If dispersers survive, they search for a territory. If found, they stop moving, establish a
236 territory, and become resident. Dispersers that do not find a territory to establish on their new
237 location keep moving, as many steps during the day as simulated for them at the beginning of the
238 day. At the end of the day, all individuals that dispersed during the day may die from a fixed
239 daily mortality probability of 0.0007 (i.e., baseline mortality estimated by inverse fitting;
240 (Kramer-Schadt et al., 2004). Dispersers that have not established during the day can move and
241 search for a territory every day during the year. At the end of the year, all individuals (i.e., the
242 ones that are still dispersers and the former dispersers that found a territory and became residents)
243 age by one year. Individuals still dispersing will do again this same loop and the new residents
244 will do the annual loop, as long as the simulation lasts or until they die.
245



246

247 **Figure A.6:** Diagram of simulated lynx dispersal movement in the lynx SE-IBM. The loop
 248 represents one step. Individuals move one cell at the time per step, up to 45 a day or until they
 249 find a territory to establish (yellow box). Individual movement is constrained by habitat types in
 250 their surroundings defined by habitat layer (brown box), probabilities to step into different habitat
 251 types and to keep a direction (i.e., correlated movement), and their memory. Blue boxes represent
 252 mortalities an individual suffers, a spatial one each time reaching a new location, derived from
 253 the collision layer (brown box) and a daily one.

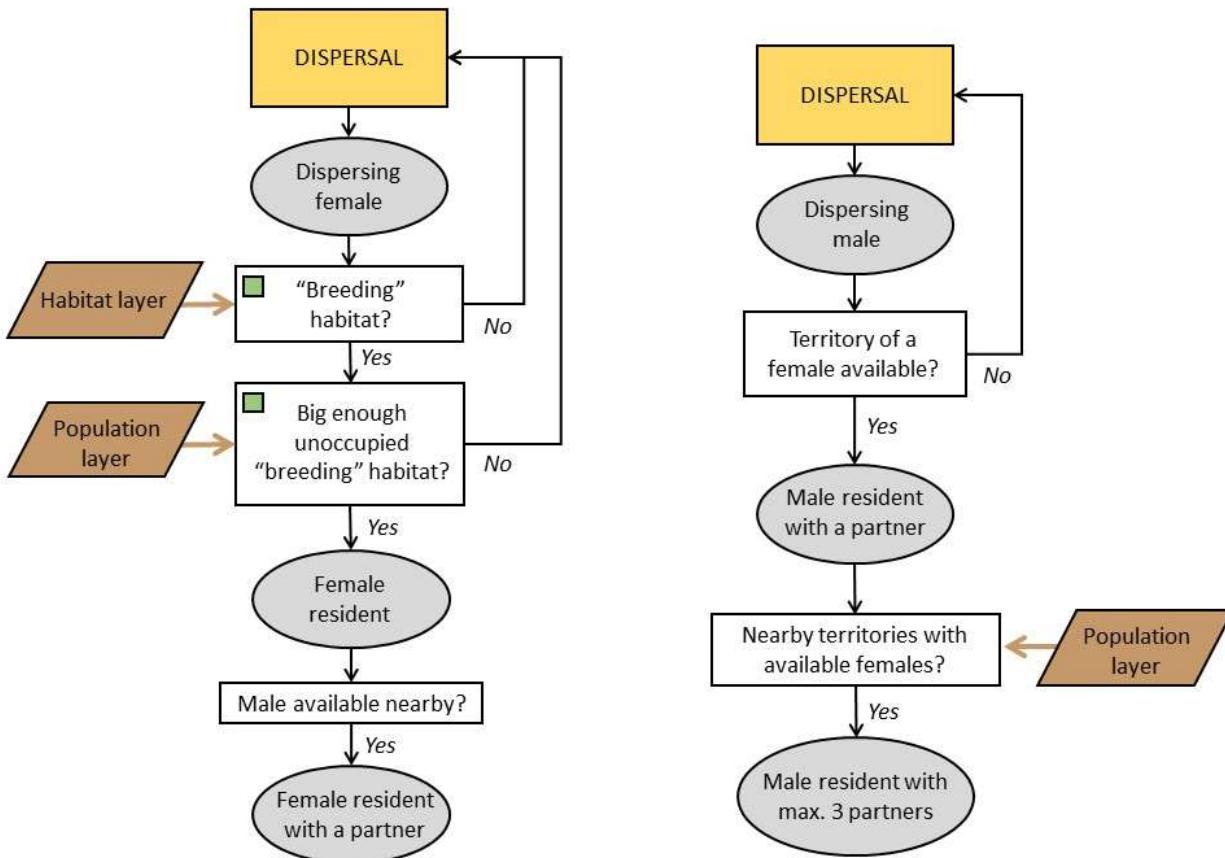
254

255 Dispersing individuals arriving at a new location have a different strategy to search for a
 256 new territory to establish regarding their sex (Fig. A.7). Females mainly look for good habitat

257 (which represent high prey availability) while males search for breeding opportunities and seek
258 female presence (Breitenmoser-Würsten et al., 2007b). Female dispersers need to be on a cell of
259 habitat type “breeding”, defined by the habitat layer, and with enough unoccupied “breeding”
260 habitats around their position to establish their territory. The size of the territory females need to
261 define represents the territory core area (Kramer-Schadt et al., 2005) and depends on the
262 population area where they are located in. We calculated these territory sizes to reach as:
263 mean(95% kernel) – sd(95% kernel), where “95% kernel” represents the territory size of female
264 residents calculated using a 95% kernel density (Heurich et al., 2018). When a female builds a
265 territory, the cells used as the territory core area are no longer available for other females. Only
266 the core areas are exclusive whereas an overlap between female territories on their edges is
267 possible, as observed with telemetry data (Breitenmoser-Würsten et al., 2007b, 2001;
268 Breitenmoser et al., 1993). Territory size to reach for the Alpine population is equal to 43.5 km²
269 (mean home range computed with a 95% kernel = 76 km², standard deviation = 32 km²;
270 (Breitenmoser-Würsten et al., 2001) and to 73 km² for the Jura population (mean home range
271 computed with a 95% kernel = 119 km², standard deviation = 46 km²; (Breitenmoser-Würsten et
272 al., 2007b). As we did not have a reliable estimate for the Vosges-Palatinian and the Black Forest
273 populations, we assigned them the value of the Jura population due to the similarity of the habitat
274 structure (Fig. A.3). The “population” layer in which population area individuals are located in
275 (Fig. A.4). For that, each cell of the gridded study area was assigned the population of its closest
276 cell of regular lynx presence. Once a female has established a territory, she becomes resident. If a
277 resident male already established his territory nearby, the male includes the new resident female’s
278 territory into his own, if he has less than three females already associated. Then, the two
279 individuals may potentially reproduce the following year. That means, the male’s dispersal
280 strategy to establish is female-dependent. At their new location, dispersing males check if they

281 arrived inside the territory of a resident female available (i.e., with no male associated). If a male
282 finds a female, he pairs with her and his territory becomes the same as the one from the female je
283 joined. He also looks at nearby territories for up to three other available females to pair with.
284 Males can pair with females whose territories are within the size of their maximum territories.
285 The maximum distance between the male location and a female territory (i.e., a cell of her
286 territory) is the radius of the mean territory size (estimated by 95% kernel density). It is equal to
287 6.6 km for males in the Alpine population (mean home range computed with a 95% kernel = 137
288 km²; (Breitenmoser-Würsten et al., 2001) and to 8.5 km for the other populations (mean home
289 range computed with a 95% kernel = 226 km²; (Breitenmoser-Würsten et al., 2007b). If there are
290 several females available for a particular male, the closest one(s) are chosen. The male can
291 potentially reproduce the following year with every three females. The male territory is defined
292 by the union of all the female territories he has paired with. If a disperser cannot find a territory
293 to create (for female) or to join (for male) at their location, it continues dispersing. If all the
294 females a male is paired with die, the male start to disperse again in search of new available
295 female.

296



297

298 **Figure A.7:** Diagram of the territory establishment in the lynx SE-IBM separated by sex. The
 299 successive grey circles represent the successive status of the individual. Females are constrained
 300 by their surrounding habitat defined by the habitat layer (brown box). Males are constrained by
 301 female presence. The territory sizes females need to establish in “breeding” habitat and the
 302 maximum distance to which males can look for available female residents are constrained by the
 303 population in which the individuals are located (population layer; brown box).

304

305 The model is coded using R 4.1.0 (R Core Team, 2014). We used the package NetLogoR
 306 (Bauduin et al., 2019) to facilitate the IBM structure implementation in R language and the
 307 package SpaDES (Chubaty and McIntire, 2018) to schedule SE-IBM rules with different time

308 units. We also used the packages `data.table` (Dowle and Srinivasan, 2019), `randomcoloR`
309 (Ammar, 2019), `raster` (Hijmans and Van Etten, 2018), and `testthat` (Wickham et al., 2019).

310

311 **Appendix B - Complete description of the lynx spatially-explicit individual-based model**
312 **following the ODD protocol (Overview, Design concepts, and Details) developed by Grimm**
313 **et al. (2006, 2010)**

314

315 **Overview**

316 *Purpose*

317 The model simulates lynx population dynamics and dispersal, accounting for the impact of the
318 road network via the risk of vehicle collisions and of the land cover to represent the lynx habitat
319 preferences (Kramer-Schadt et al., 2005). Layers (i.e., maps) of collision probabilities, lynx
320 habitats and lynx populations (Appendix A) are combined with SE-IBM rules simulating lynx
321 dispersal (Kramer-Schadt et al., 2007, 2004) and demography (Kramer-Schadt et al., 2011, 2005).

322

323 *Entities, state variables, and scales*

324 The mobile entities of the model represent lynx individuals. Each simulated individual holds
325 several characteristics:

326 - *id*: each lynx is unique and has a unique numerical identity (*id*);
327 - *heading*: direction of the lynx in degrees from 0 to 360 (0 is heading North) to one of its 8
328 neighboring cells (i.e., 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270°, 315°);
329 - *location*: coordinates of the lynx current position;
330 - *previous location*: lynx hold in memory the coordinates of their previous position;
331 - *population*: the population area where the individuals are born among Vosges-Palatinate, Black
332 Forest, Jura or Alps;
333 - *sex*: male or female;

334 - *age*: numerical value to represent the lynx age. This number represents the age as for humans
335 with 0 for the first year of life, 1 for the second year of life, etc.;
336 - *status*: resident (i.e., established with a territory) or disperser (i.e., without a territory);
337 - *steps*: number of steps dispersing lynx have to do during the current day;
338 - *last dispersing location*: dispersing lynx hold in memory the coordinates of the last cell of
339 habitat type “breeding” or “dispersal” they visited;
340 - *number matrix*: how many consecutive steps dispersing lynx move in “matrix” habitat;
341 - *male id*: for resident female only, the *id* of their male associated if they have one;
342 - *number females*: for resident male only, the number of resident females associated they have. It
343 cannot be more than 3;
344 - *road mortality territory*: mean collision probability inside its territory;
345
346 Simulated lynx progress on a gridded study area of 1 km² resolution encompassing the four
347 populations of interest: Vosges-Palatinian, Black Forest, Jura and Alpine, over Germany, France
348 and Switzerland (main text, Fig. 1). The gridded study area resolution corresponds to the lynx
349 perceptual range (Haller and Breitenmoser, 1986) and original resolution for the lynx individual-
350 based models (Kramer-Schadt et al., 2011, 2005, 2004). The gridded study area holds four
351 different variables:
352 - *collision probability* (from the collision layer): cells crossed by roads have an estimated
353 probability of fatal collision with lynx, a value between 0 and 1. The collision probability is equal
354 to 0 for cells with no road in it;
355 - *habitat type* (from the habitat layer): each cell is of one of the following habitat types:
356 “breeding”, “dispersal”, “matrix” or “barrier”;

357 - *individual territory*: this variable holds the *id* of the female residents for the cells included in
358 their territories.

359

360 *Process overview and scheduling*

361 At the beginning of each simulated year, lynx individuals are differentiated by their resident or
362 disperser *status* (Appendix A, Fig. A.5). Residents progress on a yearly time step while dispersers
363 progress on a daily time step. Resident lynx may reproduce and kittens are born. Then, residents
364 may die from a fixed annual baseline mortality and from a spatial annual mortality, the latter
365 being defined by the mean *collision probability* inside their territories. All these happen once in
366 the year. Dispersing lynx move on the gridded study area (Appendix A, Fig. A.6) and their
367 simulation time step is daily. A number of *steps* to move per day is generated for each dispersing
368 lynx at the beginning of each day. All dispersers move simultaneously, one step (i.e., cell) at the
369 time, following a correlated habitat-dependent movement influenced by the *habitat type*. After
370 each step, dispersing lynx may suffer from a spatial mortality given by the *collision probability* at
371 their new location. Then, the surviving ones search for a place where establish their territory
372 (Appendix A, Fig. A.7). Dispersing females are constrained by the *habitat type* in their
373 surroundings to establish a new territory while dispersing males are constrained by the presence
374 of available resident females for reproduction (Breitenmoser-Würsten et al., 2007b). Dispersing
375 lynx that do not establish a territory continue to disperse during their set number of *steps* per day,
376 and every day during the year until establish one. At the end of each day, lynx that dispersed
377 suffer from a fixed daily baseline dispersal mortality. At the end of a year, all lynx *age* are
378 incremented by one and their *status* is updated if applicable.

379 Simulated lynx *id*, *population*, and *sex* variables do not change during a simulation. Their
380 *heading*, *location*, *previous location*, *last dispersing location*, *number matrix*, *male id*, *number*

381 *females* and *road mortality territory* may change at every dispersal step. The *steps* variable is
382 updated each day, and *age* and *status* are updated once a year. There is no modeling of the
383 landscape during the simulation, therefore the *collision probability* and *habitat type* are constant
384 during one simulation. However, the *territory id* may change at every step (i.e., each time there is
385 a new territory created).

386

387 **Design concepts**

388 *Basic principles*

389 Our lynx SE-IBM is an assemblage of four components: three spatial layers and an existing
390 individual-based model (Kramer-Schadt et al., 2011, 2007, 2005, 2004) parameterized with field
391 data and inverse model fitting (Appendix A, Fig. A.1). The *collision probability* layer and the
392 *habitat type* layer are output maps from a collision model and a habitat model (Appendix A). The
393 population layer was generated using presence data and estimated number of lynx (Appendix A).

394

395 *Emergence*

396 Simulated males and females follow the same rules, except for the territory establishment where
397 females are constrained by the habitat and males by the presence of females (Breitenmoser-
398 Würsten et al., 2007b). In an area with few individuals, females have many possibilities of empty
399 land to establish. On the other hand, males will have to move further to find one of the few
400 females available, inducing longer dispersal movement and higher chances of dying. However, in
401 a very dense area, this can be reverse. Females will have to move further to find free land
402 whereas males, if they are not too numerous, may move less as they may have many females
403 around them to pair with. If there are many males, all females may be already taken, inducing
404 again longer dispersal for the males.

405 To breed, residents are constrained by the presence of a partner on their territory and both
406 individuals need to be in age of reproduction. The presence of a suitable partner depends on their
407 past dispersal movement and territory search, and if they could establish a new territory or not.
408 Reproduction success is therefore stochastic, as well as the number of kittens. All this will
409 modify the number of new individuals in the population.

410 Residents and dispersers are subject to a fixed baseline and spatial mortality. Both
411 mortalities are stochastic and the spatial one depends on the location of the individuals (i.e.,
412 *collision probability* at their location). The location of the individuals depends on their current or
413 past dispersal movement that depends on the *habitat type*. All this will modify the number of
414 individuals dying each year.

415

416 *Adaptation*

417 There is no adaptation in the SE-IBM (e.g., no density-dependent rules). All individuals follow
418 the same behavioral rules regarding dependent on their inner and environmental characteristics.

419

420 *Objectives*

421 Simulated lynx do not have adaptive traits and they do not have a final goal to reach. They take
422 decisions at each time step based only their current characteristics and their environment to fulfill
423 an immediate goal (e.g., where to move next).

424

425 *Learning*

426 Simulated lynx try to minimize their time spent in poor habitat quality. When they step into
427 “matrix” habitat, they store the position they just left (i.e., their last position in good habitat so
428 either in “breeding” or “dispersing” habitat) and start counting how many consecutive steps into

429 “matrix” they do. At the 10th step, if the chosen cell is still located into “matrix”, simulated lynx
430 will use their memory to find and move back to their last location of good habitat.

431

432 *Prediction*

433 Simulated lynx cannot predict the future nor have a global view of the study area. Both residents
434 and dispersers sense the current state of their environment and population in their immediate
435 surroundings and react to this information only. For example, dispersing lynx move, making
436 decisions based only on their immediate surroundings. They cannot anticipate their path nor have
437 a global view of their environment to make advantageous decisions for the long term (e.g., they
438 cannot find a better territory and/or more quickly).

439

440 *Sensing*

441 Simulated lynx can sense the *habitat types* and the *individual territories* of their surroundings.
442 Dispersers establishing a territory and trying to find a partner can sense other individuals: it
443 knows who hold nearby territories and the characteristics of these individuals, such as their *sex*
444 and the availability to pair with.

445

446 *Interaction*

447 There is a tacit competition between dispersing individuals during the territory search. Dispersers
448 evaluate their surroundings before establishing one at the time (in a random order each time). The
449 first female in the list looking for a territory has therefore more chance to find empty space to
450 establish than the last female. Similarly, the first male in the list looking for an available female
451 to join has more chance to find a partner than the last male.

452 Residents also interact with each other for reproduction. If a male and a female resident in
453 age of reproduction are on the same territory, they may reproduce and produce new individuals.
454 However, this interaction does not affect any of the individuals (i.e., a reproduction event does
455 not change the characteristics of the concerned individuals).

456

457 *Stochasticity*

458 The model involves several stochastic processes. Regarding demography, both reproduction (i.e.,
459 the reproduction event itself and the number of kittens) and mortality (both fixed baseline and
460 spatial for both residents and dispersers) are defined with probabilities and therefore outcomes
461 vary between individuals. During dispersal, the choice of the *habitat type* to select when there is a
462 mix of “breeding/dispersal” and “matrix” habitats in the lynx surroundings depends on the
463 probability to step into “matrix”. Then, there is also stochasticity in the choice of the next
464 location within the selected *habitat type*, as the choice to follow a correlated movement or not are
465 defined by probabilities, as well as the choice of the next location among those available if the
466 movement is not correlated. Finally, the number of steps dispersing simulated lynx must move
467 during a day is sampled from a probability distribution and so, the outcomes are not the same for
468 all individuals all the time.

469

470 *Collectives*

471 When a resident male finds one or several available resident females, he may pair and reproduce
472 with them. Every year, the pairs persist unless one of the lynx dies and therefore frees the other
473 one to find another partner.

474 Individuals belong to populations. The two rules different between populations are the
475 size of the territory females have to reach and the maximum size of territory males can hold (i.e.,

476 how far can they look for females). Other than that, no rule is defined at the population level and
477 the population affiliation does not affect the individual progress. Individual progress according to
478 their own characteristics.

479

480 *Observation*

481 The state of all alive simulated individuals (i.e., their location and characteristics) and of the
482 *individual territory* map are available at the end of each yearly time step. All disperser
483 movements are also recorded on a single map over the whole simulation time. Events changing
484 the demography are saved each year: which individuals died and how (i.e., from the fixed
485 baseline mortality or from collision), which individuals reproduce, who are the kittens, and which
486 individuals became residents.

487

488 **Details**

489 *Initialization*

490 At the beginning of the simulation, a grid covering the whole study area (main text, Fig. 1) with a
491 resolution of 1 km² is created. The values from the habitat layer and the collision layer are
492 transferred to the gridded study area variables *habitat type* and *collision probability*. The variable
493 *individual territory* is set to missing value (NA) everywhere. *Collision probability* on the borders
494 of the grid are set to 1 so that individuals reaching the borders of the study area die instead of
495 bouncing on the border. We assumed that these individuals would have left the study area and
496 therefore are removed from the population even if it is not unlikely that they, or others, may come
497 back.

498 Using the population layer, a lynx population is created with unique *id* for each
499 individual, *location*, *population*, as well with a *sex* and *age* (when known from field data) for

500 some individuals. A simulated individual cannot start in “matrix” or “barrier” habitats. Therefore,
 501 if some individuals’ *location* are located in these habitats, they are relocated to the closest cell of
 502 “breeding” or “dispersal” habitat. At the start of the simulation, individuals cannot have a
 503 *previous location* or a *last dispersing location*, so we used their current *location* for these two
 504 variables. For individuals with unknown *sex* or *age* (no field data), a random *sex* (male or female
 505 with ratio 1:1) and *age* (between 2 and 15) is randomly given. A random *heading* (i.e., initial
 506 direction) is given to each individual, between 0° and 360°. At the start, all individuals have a
 507 disperser *status*, 0 *steps* to do, 0 *steps* done in “matrix” (*number matrix*) and 0 for *road mortality*
 508 *territory*. As all individuals are dispersers, no couples are made so *male id* for the females are set
 509 to NA and the *number females* for males are set to 0 (Table B1).

510 The parameter values used in the SE-IBM to represent the dynamics and dispersal of the
 511 Eurasian lynx in our study area (main text, Fig. 1) are provided in Table B.1.
 512

Parameter	Explanation	Value	Reference
endTime	Number of years to simulate the lynx populations.	50	By default
pRepro	Probability of reproduction for a couple (one resident female and one resident male associated on the same territory, both in age of reproduction).	0.81	(Breitenmoser-Würsten et al., 2007a; López-Bao et al., 2019)
nKittyYoungF	Number of kittens that survive until the age of dispersal when the female is	1 or 2 (with equal)	(Breitenmoser-Würsten et al., 2007a, 2001;

	considered “young” (<code>maxAgeYoungF</code> parameter).	probability for each value)	Henriksen et al., 2005; Kramer-Schadt et al., 2005; López-Bao et al., 2019)
<code>nKittyOldF</code>	Number of kittens that survive until the age of dispersal when the female is considered “old” (<code>maxAgeYoungF</code> parameter).	0 or 1 (with equal probability for each value)	(Breitenmoser-Würsten et al., 2007a, 2001; Henriksen et al., 2005; Kramer-Schadt et al., 2005)
<code>maxAgeYoungF</code>	Age maximum for a female to be considered “young”.	11	(Henriksen et al., 2005)
<code>minAgeReproF</code>	Age minimum at which all resident females can reproduce (i.e., are sexually mature). One year younger, only half of the females are mature.	2 (3 rd year of life)	(Breitenmoser-Würsten et al., 2007a; Henriksen et al., 2005; Kvam, 1991)
<code>minAgeReproM</code>	Age minimum at which all resident males can reproduce (i.e., are sexually	3 (4 th year of life)	(Kvam, 1991)

	mature). One year younger, only half of the males are mature.		
pMortRes	Fixed annual baseline probability of mortality for resident lynx (without the risk of collisions included).	0.1	(Breitenmoser-Würsten et al., 2007a; Heurich et al., 2018)
ageMax	Age maximum a lynx can reach.	20	(von Arx et al., 2017)
xPs	Exponent value of the power function to define the daily step distribution. This distribution is used to sample a number of steps per day to move for dispersing lynx.	11	(Kramer-Schadt et al., 2004)
sMaxPs	Maximum number of steps dispersing lynx can do in one day.	45	(Kramer-Schadt et al., 2004)
pMat	Probability of stepping into “matrix” cells. This probability is multiplied by the number of “matrix” cells available for a dispersing lynx to define its probability to choose this habitat type for its next location.	0.03	(Kramer-Schadt et al., 2004)
pCorr	Movement correlation probability for dispersal movement.	0.5	(Kramer-Schadt et al., 2004)

pMortDisp	Fixed daily baseline probability of mortality for dispersing lynx (without the risk of collisions included).	0.0007	(Kramer-Schadt et al., 2004)
nMatMax	Maximum number of consecutive steps a dispersing lynx can do into “matrix” habitat. After this number of steps, disperser can use its memory to find and move in the last good habitat visited (“breeding” or “dispersal” habitat).	9	(Kramer-Schadt et al., 2004)
coreTerrSizeFAlps	Territory size (in km ²) females located in the Alpine population need to reach.	43.5	(Breitenmoser-Würsten et al., 2001; Heurich et al., 2018)
coreTerrSizeFJura	Territory size (in km ²) females located in the Jura population need to reach.	73	(Breitenmoser-Würsten et al., 2007b; Heurich et al., 2018)
coreTerrSizeFBF	Territory size (in km ²) females located in the Black Forest population need to reach.	73	(Breitenmoser-Würsten et al., 2007b; Heurich et al., 2018)

coreTerrSizeFVP	Territory size (in km ²) females located in the Vosges-Palatinian population need to reach.	73	(Breitenmoser-Würsten et al., 2007b; Heurich et al., 2018)
terrSizeMAlps	Maximum territory size (in km ²) males located in the Alpine population can reach.	137	(Breitenmoser-Würsten et al., 2001)
terrSizeMJura	Maximum territory size (in km ²) males located in the Jura population can reach.	226	(Breitenmoser-Würsten et al., 2007b)
terrSizeMBF	Maximum territory size (in km ²) males located in the Black Forest population can reach.	226	(Breitenmoser-Würsten et al., 2007b)
terrSizeMVP	Maximum territory size (in km ²) males located in the Vosges-Palatinian population can reach.	226	(Breitenmoser-Würsten et al., 2007b)
nFem	Maximum number of resident females a resident male can pair with and potentially reproduce with.	3	(Kramer-Schadt et al., 2005)

513 **Table B.1:** Parameter values used in the SE-IBM.

514

515 *Input data*

516 See Appendix A.

517

518 *Submodels*

519 Reproduction: A female resident in *age* of reproduction (1 or 2 years old, see Table B1) with a
520 resident male associated, also in *age* of reproduction (2 or 3 years old, see Table B1), may
521 reproduce and have offspring. There is a Bernoulli trial for the reproduction success with a mean
522 probability of 0.81 (Table B1). If the couple reproduces, the female can produce 1 or 2 kittens
523 with equal probability (Table B1) if she is “young” (11 years old or younger; Table B1) or 0 or 1
524 kitty with equal probability if she is “old” (12 years old or older; Table B1). Kittens obtain a
525 unique *id*. The *sex* of the kittens is randomly chosen between male and female with ratio 1:1
526 (Table B1). Their *location*, *heading* and *last dispersing location* are the ones from their mother.
527 Their *previous location* is NA. Their *population* is not the one of their parents but the one of the
528 territory where they are born. Their *age* is 0, their *status* is resident (i.e., they stay with their
529 mother and cannot disperse at this age), their *steps* and *number matrix* are 0, their *male id* is NA,
530 and their *number females* and *road mortality territory* are 0.

531

532 Mortality: Resident individuals may die from a fixed baseline annual mortality and a spatial
533 mortality using a Bernoulli trial. Mortality rate for all residents is equal to 0.1 (Table B1) for the
534 fixed baseline mortality. We did not simulate an effect of senescence but we set an age maximum
535 (20 years; (Breitenmoser-Würsten et al., 2007a; Stahl and Vandel, 1998; von Arx et al., 2017)
536 and all individuals reaching this age die. Resident individuals may also die from spatial mortality,
537 the mortality rate for female residents is the mean *collision probability* of the cells inside of their
538 territory (*road mortality territory*). For male residents, spatial mortality rate is the mean *road*
539 *mortality territory* of all his paired females.

540 When a resident female dies, her territory disappears (i.e., her *id* is removed from the *individual*
541 *territory* study area variable) and the local male resident loses one female. If this male did not
542 have other females, he becomes disperser again to look for new available female resident as male
543 home ranges are adjusted to mate availability (Breitenmoser-Würsten et al., 2007b). If the dead
544 female had kittens during the year, they all die too. When a male resident dies, its paired females
545 become available to reproduce with other males.

546

547 Demography: All individuals' *age* increment of 1. The *status* of the offspring of the year changes
548 from resident to disperser.

549

550 Dispersal: A number of steps to do during the day is sampled every day from the distribution
551 defined by Kramer-Schadt et al. (2004), one per dispersing individual. Dispersers move one cell
552 per step, into one of their 8 neighboring cell or their current cell (i.e., so a total of 9 potential cells
553 for their next location). First, there is a selection of the habitat type each disperser chooses for its
554 next location. Among those 9 cells, all cells of "barrier" type are removed from the potential
555 choices. As individuals cannot be on "barrier" habitat, it cannot happen that all 9 cells are
556 "barrier". For a dispersing individual, if all his cells are of "breeding" or "dispersal" type, this
557 type ("breeding/dispersal" without distinction between the two) is selected. If all his cells are of
558 "matrix" (i.e., habitat not favorable for lynx), this type is selected. If the cells are a mix of
559 "breeding/dispersal" and "matrix", there is a Bernoulli trial of mean 0.03 (Table B1) times the
560 number of "matrix" cells among the 9 to select the "matrix" habitat type.

561 Second, there is the choice of the cell for the next location, among all cells of the selected
562 habitat type. If there is only one cell of the selected type, the disperser goes on this one (for
563 example, if the selected cell type is "breeding/dispersal" and there is only one cell of

564 “breeding/dispersal” habitat, all other cells being “matrix” or “barrier”, therefore the only cell of
565 “breeding/dispersal” is selected). Otherwise, there is a choice either random or governed by a
566 correlation movement to select the cell. The first step of the day is never correlated, otherwise
567 there is a Bernoulli trial of mean 0.5 (Table B1) to determine if the movement is correlated for
568 each individual for each step. If there is no correlation of the movement, the choice for the cell is
569 done with an equal probability for all the cells of the selected type. If the movement is correlated,
570 the rotating angle between the individual’s heading and each cell of the selected type is
571 calculated. There is a preference for the cell minimizing this rotating angle. If the cell that the
572 individual is on is of the selected habitat type (i.e., this cell can be selected for the individual’s
573 next step which will make the lynx stay at its current location), the preference for this cell is
574 equal to the preference for the cells inducing a rotation of +/- 90 degrees, to favor a forward
575 movement. The selected cell is the one with the highest preference (i.e., smallest rotation
576 movement).

577 Third, if the selected cell is of “matrix” type, the individuals check how many consecutive
578 steps they have done in “matrix” habitat (*number matrix*). If a disperser has already step 9
579 consecutive times (Table B1) in “matrix” and this 10th consecutive step is in “matrix” too, it used
580 its memory and select, for its next location, the last visited cell of good habitat (“breeding” or
581 “dispersal”), stored in his memory (*last dispersing location*) (Kramer-Schadt et al., 2004).

582 Finally, all dispersers rotate towards their selected cell and move to the center of it. They
583 update their *previous location* with the coordinates of the cell they were before moving. If their
584 new location if of type “breeding” or “dispersal”, this location is stored in their memory for the
585 *last dispersing location*, and their *number matrix* is reset to 0. If their new location is of type
586 “matrix”, their *number matrix* increments of 1.

587 Now, disperser may be also subject to spatial mortality. There is a Bernoulli trial for each
588 disperser with mean equal to the *collision probability* value of their new location. Dispersers that
589 do not die from spatial mortality search for a new home range to establish (*searchTerritory* sub-
590 model). At the beginning of the simulation, all initial individuals were created as dispersers
591 because we did not have data on lynx territories Thus, we decided to let simulated individuals
592 establish their initial territories. Individuals needs some time to do so, therefore we did not apply
593 any mortality during the first year of simulation to allow dispersers to establish their territories.

594 The dispersal movement is done until all dispersing individuals have reached their number
595 of steps to do during the day, or they have established a territory and are now resident, or they
596 died from spatial mortality. At the end of the day, all individuals that were dispersers at the
597 beginning of the day (even the ones that established a territory during the day) may die from a
598 fixed daily baseline mortality. There is a Bernoulli trial of mean 0.0007 (Table B1) for each
599 individual. If some of the individuals dying established a territory during this day, there is an
600 update of their characteristics similarly as the death of resident individuals. As the spatial
601 mortality, there is no fixed daily baseline mortality applied the first year of the simulation.

602

603 SearchTerritory: Dispersing individuals arriving at a new location search for a territory to
604 establish, one at the time, and females first (i.e., male establishment depending on female
605 territories). One at the time, in a random order each time, females evaluate their surroundings to
606 establish their territory. Females needs to be on a cell of “breeding” type that is not already
607 included in any territory to start creating their own. Then, they need to have enough empty
608 contiguous cells of “breeding” habitat to create a big enough territory (Table B1). When enough
609 empty contiguous cells of “breeding” habitat are present, females establish their territory and
610 becomes resident. Otherwise, they stay disperser and keep dispersing. After a female establishes

611 her territory, all the cells of this territory become occupied and are not available anymore for the
612 other females. The female *id* is given to the *individual territory* study area variable for all cells in
613 her territory. The mean *collision probability* of the territory is calculated and given to the female
614 for her *road mortality territory*. Then, the female checks if there is a resident male around. If
615 there is a male not further than the radius of the maximum territory size for the male (Table B1)
616 and he has less than three females associated, she pairs with him. Then, she obtains the male *id*
617 for her *male id* and the *number females* of the male increments of 1.

618 After all dispersing females tried to establish, dispersing males try to disperse of their
619 own, one at the time in a random order each time. Each male checks if the cell they are currently
620 on is located inside the territory of an available female (i.e., without male associated yet). If there
621 is one, the male pairs with this female and becomes resident. His territory is the same one as the
622 female and its *number females* is set to 1. The female obtains the male *id* for her *male id*
623 variables. Then, the male also looks if there are other nearby available females to pair with, as far
624 as the radius of its maximum territory size (Table B1). He can pair with up to three available
625 females. The male territory represents the union of all the female territory with which he paired
626 with. His *road mortality territory* is the mean value of the *road mortality territory* of all the
627 females he paired with.

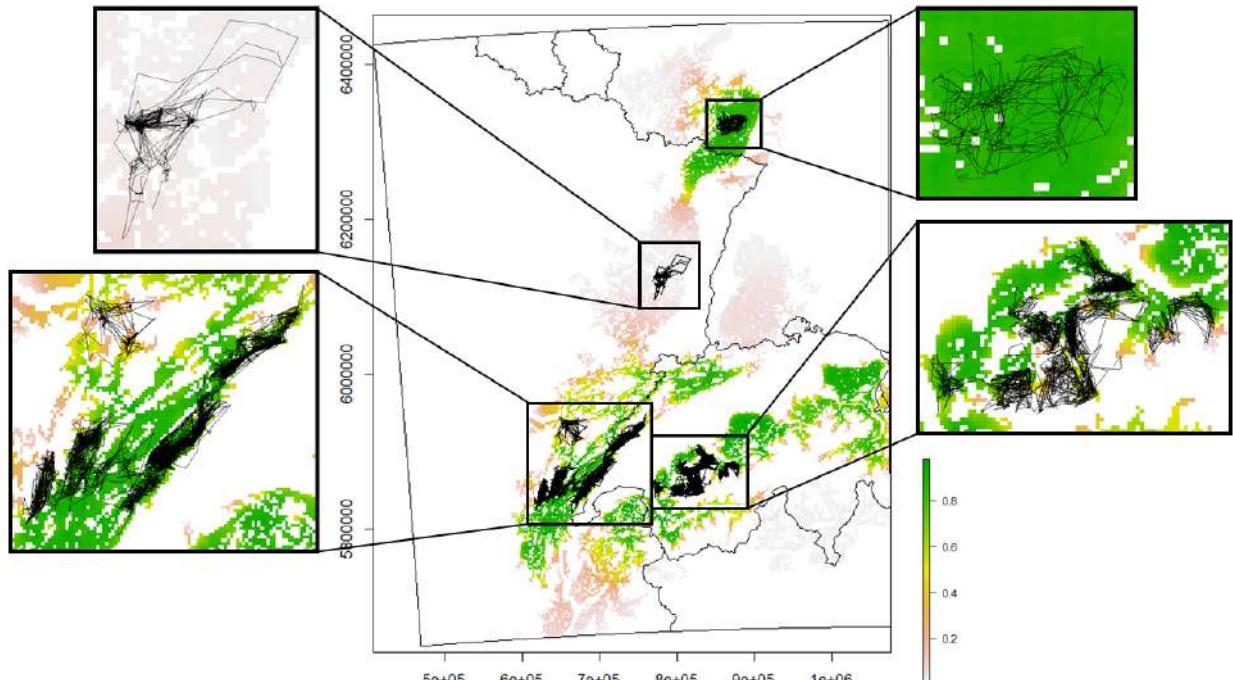
628

629 **Appendix C – Model validation using telemetry data**

630

631 We performed a qualitative validation of the lynx model predictions using tracks from collared
632 female residents. The map below (Fig. C.1) shows the simulated territory occupancy with darker
633 green colors representing areas most often occupied by female territories across simulation
634 replicates (main text, Fig. 4). We overlaid GPS and VHF paths from collared female residents on
635 the map. Data for the Vosges-Palatinate consist in 2 females in the Palatinate Forest (Germany)
636 and 1 in the Vosges Mountains (France) (locations recorded in 2017-2018; (Scheid et al., 2021)).
637 Data in the Jura represent 4 females in France and 13 in Switzerland (locations recorded in 1988-
638 1998; (Breitenmoser-Würsten et al., 2007b). Data in the Alps (Switzerland) represent 16 females
639 (locations recorded in 1997-2000; (Breitenmoser-Würsten et al., 2001). We show the full study
640 area and 4 zoomed areas on the telemetry locations. Overall, the realized movements and territory
641 emergence inferred from field data were coherent with the frequencies across simulation
642 replicates of the territories defined by simulated lynx. Most of the recorded tracks were located in
643 cells with a high frequency of territory occupancy and very few were located in cells where no
644 territories were simulated.

645



646

647 **Figure C.1:** Occupancy by female territories at the last year of simulation over the whole study
 648 area (black rectangle) used in the lynx SE-IBM using the habitat model. Limits of the countries
 649 (main text, Fig. 1) are overlaid in black over the map. Values between 0 and 1 are mean
 650 occupancy probability per cell of 1 km² over 200 replicates (e.g., cell with value equal to 1 were
 651 always occupied in all simulation replicates). GPS and VHF recorded paths for female residents
 652 are overlaid as thin black lines. A zoom of different areas are presented on the sides of the central
 653 map.

654

655

656 **References**

- 657 Ammar, R., 2019. randomcoloR: Generate Attractive Random Colors.
- 658 Basille, M., Van Moorter, B., Herfindal, I., Martin, J., Linnell, J.D.C., Odden, J., Andersen, R.,
- 659 Gaillard, J.M., 2013. Selecting habitat to survive: the impact of road density on survival in a
- 660 large carnivore. PLoS One 8, e65493. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0065493>
- 661 Bauduin, S., McIntire, E.J.B., Chubaty, A.M., 2019. NetLogoR: a package to build and run
- 662 spatially explicit agent-based models in R. Ecography (Cop.). 42, 1841–1849.
- 663 <https://doi.org/10.1111/ecog.04516>
- 664 Breitenmoser-Würsten, C., Vandel, J.-M., Zimmermann, F., Breitenmoser, U., 2007a.
- 665 Demography of lynx *Lynx lynx* in the Jura Mountains. Wildlife Biol. 13, 381–392.
- 666 [https://doi.org/10.2981/0909-6396\(2007\)13](https://doi.org/10.2981/0909-6396(2007)13)
- 667 Breitenmoser-Würsten, C., Zimmermann, F., Ryser, A., Capt, S., Laass, J., Siegenthaler, A.,
- 668 Breitenmoser, U., 2001. Untersuchungen zur Luchspopulation in den Nordwestalpen der
- 669 Schweiz 1997–2000, KORA Bericht.
- 670 Breitenmoser-Würsten, C., Zimmermann, F., Stahl, P., Vandel, J.-M., Molinari-Jobin, A.,
- 671 Molinari, P., Capt, S., Breitenmoser, U., 2007b. Spatial and social stability of a Eurasian
- 672 lynx *Lynx lynx* population: an assessment of 10 years of observation in the Jura Mountains.
- 673 Wildlife Biol. 13, 365–380. [https://doi.org/10.2981/0909-6396\(2007\)13\[365:sassoa\]2.0.co;2](https://doi.org/10.2981/0909-6396(2007)13[365:sassoa]2.0.co;2)
- 674 Breitenmoser, U., Kavczensky, P., Dötterer, M., Breitenmoser-Würsten, C., Capt, S., Bernhart,
- 675 F., Liberek, M., 1993. Spatial organization and recruitment of lynx (*Lynx lynx*) in a re-
- 676 introduced population in the Swiss Jura Mountains. J. Zool. London 231, 449–464.
- 677 Charbonnel, A., Germain, E., 2020. Plan Régional d'Actions en faveur du Lynx boréal (*Lynx*
- 678 *lynx*) dans le Massif des Vosges : rétablir le Lynx dans un état de conservation favorable
- 679 dans le cadre d'une démarche participative, concertée et partagée avec les acteurs du

680 territoire. Lucy (57), France.

681 Chubaty, A.M., McIntire, E.J.B., 2018. Package “SpaDES”: Develop and Run Spatially Explicit
682 Discrete Event Simulation Models.

683 Dowle, M., Srinivasan, A., 2019. *data.table*: Extension of “*data.frame*. ”

684 Duchamp, C., Boyer, J., Briaudet, P.E., Leonard, Y., Moris, P., Bataille, A., Dahier, T., Delacour,
685 G., Millisher, G., Miquel, C., Poillot, C., Marboutin, E., 2012. A dual frame survey to assess
686 time- and space-related changes of the colonizing wolf population in France. *Hystrix* 23, 1–
687 12. <https://doi.org/10.4404/hystrix-23.1-4559>

688 Gatti, S., Blanc, L., Gimenez, O., Marboutin, E., 2014. Estimation des densités de lynx dans le
689 massif du Jura entre 2011 et 2014. *Faune Sauvag.* 304, 4–8.

690 Gimenez, O., Gatti, S., Duchamp, C., Germain, E., Laurent, A., Zimmermann, F., Marboutin, E.,
691 2019. Spatial density estimates of Eurasian lynx (*Lynx lynx*) in the French Jura and Vosges
692 Mountains. *Ecol. Evol.* 9, 11707–11715. <https://doi.org/10.1002/ece3.5668>

693 Grimm, V., Berger, U., Bastiansen, F., Eliassen, S., Ginot, V., Giske, J., Goss-Custard, J., Grand,
694 T., Heinz, S.K., Huse, G., Huth, A., Jepsen, J.U., Jørgensen, C., Mooij, W.M., Müller, B.,
695 Pe'er, G., Piou, C., Railsback, S.F., Robbins, A.M., Robbins, M.M., Rossmanith, E., Rüger,
696 N., Strand, E., Souissi, S., Stillman, R.A., Vabø, R., Visser, U., DeAngelis, D.L., 2006. A
697 standard protocol for describing individual-based and agent-based models. *Ecol. Modell.*
698 198, 115–126. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.04.023>

699 Grimm, V., Berger, U., DeAngelis, D.L., Polhill, J.G., Giske, J., Railsback, S.F., 2010. The ODD
700 protocol: A review and first update. *Ecol. Modell.* 221, 2760–2768.
701 <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.08.019>

702 Haller, H., Breitenmoser, U., 1986. Zur Raumorganisation der in den Schweizer Alpen
703 wiederangesiedelten Population des Luchses *Lynx lynx*. *Z. Säugetierk.* 51, 289–311.

- 704 Henriksen, H.B., Andersen, R., Hewison, A.J.M., Gaillard, J.-M., Bronndal, M., Jonsson, S.,
705 Linnell, J.D.C., Odden, J., 2005. Reproductive biology of captive female Eurasian lynx,
706 *Lynx lynx*. Eur. J. Wildl. Res. 51, 151–156. <https://doi.org/10.1007/s10344-005-0104-1>
- 707 Heurich, M., Schultze-naumburg, J., Piacenza, N., Magg, N., Čeverny, J., Engleder, T.,
708 Hertfelder, M., Sladova, M., Kramer-Schadt, S., 2018. Illegal hunting as a major driver of
709 the source-sink dynamics of a reintroduced lynx population in Central Europe. Biol.
710 Conserv. 224, 355–365. <https://doi.org/S0006320717314003>
- 711 Hijmans, R.J., Van Etten, J., 2018. Package “raster”: Geographic Data Analysis and Modeling.
- 712 Isaac, N.J.B., van Strien, A.J., August, T.A., de Zeeuw, M.P., Roy, D.B., 2014. Statistics for
713 citizen science: extracting signals of change from noisy ecological data. Methods Ecol. Evol.
714 5, 1052–1060. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12254>
- 715 Jedrzejewski, W., Jedrzejewska, B., Okarma, H., Schmidt, K., Bunevich, A.N., Miłkowski, L.,
716 1996. Population dynamics (1869-1994), demography, and home ranges of the Lynx in
717 Białowieża Primeval Forest (Poland and Belarus). Ecography (Cop.). 19, 122–138.
- 718 Kramer-Schadt, S., Kaiser, T.S., Frank, K., Wiegand, T., 2011. Analyzing the effect of stepping
719 stones on target patch colonisation in structured landscapes for Eurasian lynx. Landsc. Ecol.
720 26, 501–513. <https://doi.org/10.1007/s10980-011-9576-4>
- 721 Kramer-Schadt, S., Revilla, E., Wiegand, T., 2005. Lynx reintroductions in fragmented
722 landscapes of Germany: Projects with a future or misunderstood wildlife conservation? Biol.
723 Conserv. 125, 169–182. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2005.02.015>
- 724 Kramer-Schadt, S., Revilla, E., Wiegand, T., Breitenmoser, U., 2004. Fragmented landscapes,
725 road mortality and patch connectivity: modelling influences on the dispersal of Eurasian
726 lynx. J. Appl. Ecol. 41, 711–723.
- 727 Kramer-Schadt, S., Revilla, E., Wiegand, T., Grimm, V., 2007. Patterns for parameters in

- 728 simulation models. *Ecol. Modell.* 204, 553–556.
- 729 <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.01.018>
- 730 Kvam, T., 1991. Reproduction in the European lynx, *Lynx lynx*. *Zeitschrift für Säugetierkd.* 56,
- 731 146–158.
- 732 López-Bao, J.V., Aronsson, M., Linnell, J.D.C., Odden, J., Persson, J., Andrén, H., 2019.
- 733 Eurasian lynx fitness shows little variation across Scandinavian human-dominated
- 734 landscapes. *Sci. Rep.* 9, 8903. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45569-2>
- 735 Outhwaite, C.L., Chandler, R.E., Powney, G.D., Collen, B., Gregory, R.D., Isaac, N.J.B., 2018.
- 736 Prior specification in Bayesian occupancy modelling improves analysis of species
- 737 occurrence data. *Ecol. Indic.* 93, 333–343. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.05.010>
- 738 R Core Team, 2014. R: A language and environment for statistical computing.
- 739 Scheid, C., Germain, E., Schwoerer, M.-L., 2021. Les Lynx (*Lynx lynx*) du Pfälzerwald
- 740 s’installent progressivement dans le Massif des Vosges. *Ann. Sci. Rés. Bios. Trans. Vosges*
- 741 du Nord.
- 742 Stahl, P., Vandel, J.-M., 1998. Le Lynx boréal : *Lynx lynx* (Linné, 1758). *Encycl. des Carniv. Fr.*
- 743 Visintin, C., Golding, N., van der Ree, R., McCarthy, M.A., 2018. Managing the timing and
- 744 speed of vehicles reduces wildlife-transport collision risk. *Transp. Res. Part D* 59, 86–95.
- 745 <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.12.003>
- 746 Visintin, C., van der Ree, R., McCarthy, M.A., 2017. Consistent patterns of vehicle collision risk
- 747 for six mammal species. *J. Environ. Manage.* 201, 397–406.
- 748 von Arx, M., Breitenmoser-Würsten, C., Zimmermann, F., Kunz, F., Vogt, K., Ryser, A., Struch,
- 749 M., Breitenmoser, U., 2017. Der Luchs im Jura - unter besonderer Berücksichtigung des
- 750 Solothurner Juras. *Naturforschende Gesellschaft des Kantons Solothurn* 43, 177–234.
- 751 Wickham, H., RStudiom, R Core Team, 2019. Package “testthat.”

752 Wölfl, S., Anders, O., Middelhoff, T.L., Hohmann, U., Back, M., Idelberger, S., Krebühl, J.,
753 Ohm, J., Prüssing, A., Herdtfelder, M., Böcker, F., Erretkamps, J., Kopaniak, L., Wölfl, M.,
754 Jokisch, S., Hucht-Ciorga, I., Teubner, J., Trost, M., Zschille, J., Jeß, E., Steinberg, C., 2021.
755 Status des Luchses in Deutschland. Natur und Landschaft 96.
756

ANNEXE 3 : Olivier C.-A. 2018. Étude comparative de différentes méthodes de modélisation de corridors écologiques pour le Lynx boréal en France. Rapport de stage de Master 2 réalisé au CROC en collaboration avec le CNRS CEFE, Lucy, France, 42p.



Mémoire de fin d'étude Master 2

Étude comparative de différentes méthodes de modélisation
de corridors écologiques pour le Lynx boréal en France

Charlotte-Anaïs OLIVIER

Master 2 BGE, axe Écologie Continentale - École pratique des Hautes Études
Année 2017-2018

Stage de fin d'étude réalisé du 1 février au 17 août 2018

Laboratoire d'accueil :

CROC / Centre de Recherche et d'Observation sur les Carnivores
4 Rue de la Banie
57590 LUCY

Tuteurs de stage :

CHARBONNEL Anaïs : Chargée d'études scientifiques au CROC
COULON Aurélie : Maître de Conférences du Muséum National d'Histoire Naturelle
GERMAIN Estelle : Directrice du CROC
GIMENEZ Olivier : Directeur de recherche CNRS au CEFE

RESUME :

La modélisation des corridors écologiques est une étape indispensable à l'évaluation de la connectivité et à la définition de mesures de gestion en faveur de la conservation d'une espèce. Dans la présente étude, trois méthodes de modélisation de la connectivité potentielle pour le Lynx en France ont été comparées : le chemin de moindre coût, la théorie des circuits et le modèle individu-centré spatialement explicite. Les résultats obtenus montrent l'existence d'une connectivité potentielle entre le sud du Massif de Jura et le nord du Massif des Alpes. En revanche, la connectivité entre le Massif du Jura et le Massif des Vosges n'a pas conduit à un consensus. Au vu des résultats contrastés, il apparaît important d'utiliser différentes méthodes pour modéliser la connectivité potentielle. Ces résultats prometteurs nécessitent des investigations supplémentaires afin de stabiliser le diagnostic de connectivité pour le Lynx en France et aboutir à des mesures concrètes de conservation.

Lynx lynx ; connectivité potentielle ; chemin de moindre coût ; théorie des circuits ; modèle individu-centré spatialement explicite ;

ABSTRACT:

Ecological corridor modeling is an essential step in assessing connectivity and defining management actions for species conservation. In the present study, three methods for modeling potential connectivity for Lynx in France were compared: least-cost path, circuit theory and spatially explicit individual-based model. The results obtained show the existence of a potential connectivity between the south of Jura Mountains and the north of Alpes Mountains. Moreover, the connectivity between the Jura Mountains and the Vosges Mountains did not lead to a consensus. Given the contrasting results, it seems important to use different methods to model potential connectivity. These promising results require further investigation in order to stabilize the connectivity diagnosis for Lynx in France and lead to concrete conservation measures.

Lynx lynx; potential connectivity; least-cost path; circuit theory; spatially explicit individual-based model;

REMERCIEMENTS :

En premier lieu, je tiens à remercier l'ensemble des partenaires financiers qui ont permis la réalisation de ce stage dans le cadre du programme ERC-Lynx « Éviter, réduire et compenser la mortalité du Lynx par collision avec les véhicules de transport » porté par le CEFE, le Cerema, le CROC et l'ONCFS :

- Partenaires financiers de ce programme ITTECOP : le Ministère de la Transition Écologique et Solidaire, l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie, la Fondation pour la Recherche sur la Biodiversité (FRB), l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) ;



- Partenaires financiers du CROC : l'Union Européenne dans le cadre du Programme Opérationnel FEDER-FSE Lorraine et Massif des Vosges 2014-2020, la DREAL Grand Est, la Région Grand Est, le Fond National d'Aménagement et de Développement du Territoire (FNADT) / Commissariat à l'Aménagement du Massif des Vosges, ainsi que la Fondation d'Entreprise UEM.



Ensuite, je souhaite remercier toute l'équipe du CROC pour la bonne humeur et les bonnes conditions dans lesquelles j'ai été accueillie.

Je remercie mon équipe encadrante, Anaïs CHARBONNEL et Estelle GERMAIN du CROC ainsi qu'Aurélie COULON et Olivier GIMENEZ du CEFE, pour m'avoir fait confiance durant ces six mois et pour m'avoir permis de réaliser ce stage si passionnant. Je les remercie pour tous les conseils ainsi que les différentes relectures qui ont abouti à la réalisation de ce mémoire.

Merci Anaïs pour les réponses à mes très nombreuses questions quotidiennes, tes encouragements, ta bienveillance et ta gentillesse lors de ces six mois. J'ai beaucoup appris à tes côtés. Merci pour tous tes conseils professionnels comme personnels.

Merci Estelle pour ton implication, ton écoute, ton organisation, ta rigueur et pour tout ce que tu m'as appris.

Merci Aurélie pour ta réactivité, ta disponibilité lors de nos échanges et pour toute l'aide apportée lors de la modélisation.

Merci Olivier pour ta réactivité et ta disponibilité également, ainsi que pour ta bonne humeur et ton humour.

Je tiens également à remercier :

- Le Cerema et l'ONCFS, partenaires du programme ERC-Lynx, pour les échanges constructifs qui ont émergé pendant mon stage.
- Sarah BAUDUIN pour son implication, le modèle individu-centré et pour avoir pris le temps de répondre à mes questions sous R.
- Morgane PAPIN pour sa gentillesse, ses conseils et pour les nombreuses discussions qui m'ont beaucoup apporté.

Enfin, je remercie mes parents, mes sœurs et Anh-Phuong pour leur soutien sans faille...

TABLE DES MATIERES

I - INTRODUCTION	1
II - MATERIEL ET METHODES	5
II.I Espèce étudiée	5
II.II Zone d'étude	6
II.III Modélisation de la connectivité potentielle pour le Lynx en France	7
II.III.1 Création de la carte d'habitat du Lynx en France	7
II.III.2 Création de la carte des patchs d'habitat favorable.....	9
II.III.3 Création de la carte de résistance	9
II.III.4 Analyses de la connectivité potentielle	12
II.III.5 Corridors potentiels et zones à enjeux pour le Lynx en France	14
III - RESULTATS.....	15
III.I Habitat du Lynx en France, patchs d'habitat favorable et carte de résistance	15
III.II Analyses de la connectivité potentielle	16
III.II.1 Analyse du chemin de moindre coût (LCP)	16
III.II.2 Théorie des circuits	17
III.II.3 Modèle IBM.....	17
III.III Description des corridors potentiels et des éléments fragmentants majeurs issus de la méthode LCP (approche ' <i>Barycentre</i> '), de la théorie des circuits et du modèle IBM (sans collision)	18
III.III.1 Corridors et éléments fragmentants majeurs entre les massifs des Vosges (patch 1) et du Jura (patchs 2 et 3)	18
III.III.2 Corridors et éléments fragmentants entre les massifs du Jura (patch 3) et des Alpes (patch 4)	18
III.IV Corridors potentiels et zones à enjeux pour le Lynx en France	20
IV - DISCUSSION.....	21
IV.I Connectivité potentielle pour le Lynx en France.....	21
IV.II Points forts et limites des trois méthodes d'analyse	22
IV.III Pistes d'améliorations des analyses de la connectivité.....	23
IV.IV Enjeux pour l'amélioration de la connectivité pour le Lynx	25
V - CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	26
VI - BIBLIOGRAPHIE	27
VII - ANNEXES	31

I - INTRODUCTION

Les perturbations naturelles ou anthropiques génèrent des changements dans la structure des paysages. Ces changements peuvent être à l'origine de l'isolement des zones d'habitat favorable aux espèces et contribuer à leur extinction (Noss *et al.*, 1996 ; Woodroffe et Ginsberg, 1998). C'est le cas plus particulièrement de la fragmentation¹ et la destruction des habitats naturels qui contribuent à l'augmentation de la mortalité des individus (Fahrig *et al.*, 1995), à la diminution de leur succès de dispersion² (Gibbs, 1998) induisant ainsi une hausse du taux de consanguinité et une perte de diversité génétique (Reh et Seitz, 1990 ; Wilson et Provan, 2003). Dans certains cas, si la dispersion est empêchée par le fait qu'il n'existe plus de continuité d'habitat favorable, ce sont des populations voire des espèces qui sont susceptibles de décliner puis de disparaître (Brown et Kodric-Brown, 1977 ; Harrison, 1992). Ainsi, la possibilité que des individus puissent traverser des paysages perturbés par l'homme est essentielle pour le maintien à long terme des populations (Fahrig, 2003 ; Cushman, 2006). Aujourd'hui, un des principaux enjeux des gestionnaires de la biodiversité est de permettre les déplacements des individus entre les zones d'habitat favorable (souvent appelés patchs), de façon à éviter l'isolement des populations et atténuer ainsi les impacts de la fragmentation ou de la destruction de l'habitat (Crooks et Sanjayan, 2006). Dans un premier temps, il apparaît important d'évaluer la connectivité entre les patchs d'habitat favorable, c'est-à-dire le degré avec lequel le paysage facilite ou entrave les mouvements des organismes (Taylor *et al.*, 1993 ; Tischendorf et Fahrig, 2000). Puis, les gestionnaires chercheront à préserver ou à améliorer cette connectivité par la création, la restauration ou la conservation de passages, appelés corridors, existant entre les patchs d'habitat favorable (Crooks et Sanjayan, 2006). Ces corridors sont des éléments linéaires qui favorisent le déplacement des individus au sein de leurs domaines vitaux ou leur dispersion vers de nouveaux territoires (Beier *et al.*, 2008). La quantification de la connectivité entre les patchs d'habitat favorable pour une espèce est donc une étape importante et essentielle pour la définition et la mise en place de mesures de gestion des corridors (Moilanen et Hanski, 2001 ; Moilanen et Nieminen, 2002).

Trois catégories de méthodes existent actuellement pour mesurer la connectivité du paysage, correspondant à différentes déclinaisons de la connectivité (Calabrese et Fagan, 2004). La *connectivité structurelle* fait référence à la contiguïté de l'habitat, elle se focalise uniquement sur l'agencement spatial du paysage. Elle peut être mesurée par des indicateurs tels que la taille des patchs ou leur nombre. L'estimation de la connectivité structurelle a l'avantage de nécessiter des données faciles à collecter, mais a néanmoins un intérêt très limité puisqu'elle ne tient pas compte des caractéristiques

¹ Il y a fragmentation lorsqu'un écosystème est transformé, par action humaine, en de nombreux fragments de taille réduite, spatialement isolés les uns des autres par un ensemble d'habitats différents de ceux d'origine (Wilcove *et al.*, 1986).

² Mouvement d'un animal de son point d'origine vers une autre zone où la reproduction est possible (Howard 1960).

de l'espèce (Moilanen et Nieminen, 2002). La *connectivité potentielle* combine les caractéristiques du paysage avec des données sur la dispersion de l'espèce (Urban et Keitt, 2001). Son évaluation tient compte de l'espèce considérée, de sa manière d'utiliser son habitat et du reste des éléments paysagers, qu'il s'agisse de leur composition ou de leur configuration spatiale (Taylore *et al.*, 1993). Elle repose dans l'estimation des potentialités de déplacement des individus au sein de la zone étudiée, non pas à partir de données d'observations collectées sur cette zone, mais à partir d'estimations fondées notamment sur des caractéristiques écologiques de l'espèces et sur les caractéristiques physiques du paysage (Rathore *et al.*, 2012). Enfin, la dernière déclinaison est la *connectivité fonctionnelle*, qui consiste à estimer des déplacements réels des individus au sein du paysage. Son estimation repose donc sur des données de déplacement d'individus entre les patchs d'habitat favorable, voire d'individus en dispersion. Plus informative, elle est néanmoins plus coûteuse (matériel, moyens humains) et plus difficile à étudier (nécessité de capturer des animaux pour des suivis par radiotélémétrie, GPS, etc. ; Hilty et Merenlender, 2004 ; Fagan et Calabrese, 2006 ; Graves *et al.*, 2007). Elle est généralement utilisée à petite échelle (Calabrese et Fagan, 2004).

Dans un contexte opérationnel (de gestion), l'analyse de la connectivité potentielle semble la meilleure approche pour évaluer la connectivité. Elle présente en effet un bon compromis entre facilité d'obtention des données et prise en compte des caractéristiques des espèces. De plus, les méthodes d'analyse existantes sont applicables à de larges échelles spatiales. Actuellement, on distingue différents modèles permettant d'étudier la connectivité potentielle : les modèles basés sur des estimations de moindres coûts, les modèles modélisant les flux de dispersion et les modèles individu-centré spatialement explicites. Pour les modèles basés sur des estimations de moindres coûts, l'analyse du chemin de moindre coût ‘Least-Cost Path’ (LCP ; Walker et Craighead, 1997 ; Singleton *et al.*, 2002 ; Larue et Nielsen, 2008) est la méthode la plus couramment utilisée par les gestionnaires et les chercheurs car simple d'utilisation. Elle représente une approche intermédiaire pour l'identification des corridors en termes d'exigences de données et de complexité du modèle (Adriaensen *et al.*, 2003). La LCP évalue les trajectoires potentielles des individus à travers le paysage en se basant sur leur « coût » de déplacement entre les patchs d'habitat favorable (Beier *et al.*, 2009). Ce coût peut représenter la difficulté de déplacement, l'évitement de certains types d'éléments paysagers ou encore le risque de prédation (Beier *et al.*, 2008). Ces coûts sont estimés à partir d'une carte de résistance où chaque maille a une valeur de coût dépendante de l'occupation du sol se trouvant dans cette maille. Parmi les différentes trajectoires possibles, le chemin de moindre coût est celui dont la somme des coûts des mailles traversées est la plus faible. Il représente donc le trajet optimal qu'un individu est susceptible de prendre (Walker et Craighead, 1997). L'approche LCP est critiquée par de nombreux auteurs dans la mesure où elle ne prend en compte que les corridors optimaux et ne donne aucune information sur les corridors alternatifs (Chetkiewicz et Boyce, 2009 ; Cushman *et al.*, 2013). De plus, elle suppose

que les individus aient une connaissance parfaite du paysage, leur permettant de suivre le chemin optimal (Cushman *et al.*, 2013 ; Coulon *et al.*, 2015). La théorie des circuits électriques est un second modèle qui se base également sur des cartes de résistance aux mouvements des espèces. Proposée par McRae (2006), cette approche est une alternative complétant la LCP puisqu'elle permet de trouver une multitude de corridors modélisés sous forme de flux (flux de dispersion). Le modèle se base sur l'analogie entre le mouvement des individus à travers un paysage et le courant électrique se déplaçant au sein d'éléments de résistance plus ou moins importants (McRae *et al.*, 2008). Il met en évidence les goulots d'étranglement dans les secteurs (patchs ou corridors) à enjeux pour la dispersion, où se concentrent les plus forts courants. Il présente également l'avantage de prendre en compte la marche aléatoire des individus (McRae *et al.*, 2008). En revanche, il n'incorpore pas de réponses comportementales variant dans l'espace et dans le temps (Coulon *et al.*, 2015). Pour terminer, la méthode basée sur des modèles individu-centré spatialement explicites (IBM : '*individual-based model*') prend en considération et simule le comportement supposé des individus lorsqu'ils se déplacent dans le paysage (Zollner et Lima, 1999 ; Barton *et al.*, 2012). La connectivité quantifiée par ce modèle est donc le résultat du comportement (les déplacements, la dispersion) des individus en réponse à l'hétérogénéité du paysage, associée à sa composition et sa structure spatiale (Revilla *et al.*, 2004). Cette méthode, bien que très informative (Palmer *et al.*, 2011), présente l'inconvénient d'exiger généralement un grand nombre de paramètres, nécessitant une très bonne connaissance de la biologie de l'espèce (Coulon *et al.*, 2015). A ce jour, il existe peu d'études s'étant focalisées sur la comparaison d'approches méthodologiques différentes (e.g. Coulon *et al.*, 2015 ; Bond *et al.*, 2017).

Parmi les espèces sensibles à la fragmentation de l'habitat, les grands carnivores sont particulièrement concernés (Weaver *et al.*, 1996 ; Crooks 2002). En effet, ces espèces occupent de grands territoires au sein desquels elles se déplacent beaucoup (Hetherington *et al.*, 2006). De plus, certaines espèces de grands carnivores sont aujourd'hui présentes dans des paysages à prédominance humaine, ce qui les amène à se répartir sous forme de petites populations fragmentées et isolées sur l'ensemble de leur aire de répartition. C'est le cas du Lynx boréal (*Lynx lynx*) dont la majorité des populations présentes en Europe sont fragmentées en raison d'un manque de connectivité au sein de paysages anthropisés (Schadt *et al.*, 2002 ; Kramer-Schadt *et al.*, 2004 ; Marboutin *et al.*, 2011). Cette fragmentation rend difficile la colonisation naturelle de territoires jadis occupés par l'espèce (Kramer-Schadt *et al.*, 2004 ; Zimmermann *et al.*, 2005). La fragmentation du milieu forestier est d'ailleurs reconnue comme une menace majeure pesant sur l'espèce de par ses besoins de grands espaces forestiers continus et ses capacités de dispersion relativement limitées (Zimmermann *et al.*, 2007 ; Magg *et al.*, 2016). Les collisions avec les véhicules représentent également une importante cause de mortalité chez l'espèce (Hemery *et al.*, 2011) et donc un frein à sa dispersion. Différents travaux ont été conduits pour évaluer la connectivité potentielle pour le Lynx en Europe afin de localiser, puis décrire, les corridors

identifiés (en Allemagne par Schadt *et al.*, 2002, en Suisse par Zimmermann et Breitenmoser, 2007, en France par Assmann, 2011 et Blanc *et al.*, 2015). La plupart de ces travaux ont utilisé la méthode LCP entre les patchs d'habitat favorable. Cependant, aucun d'entre eux n'a jusqu'à présent exploré des méthodes de modélisation plus robustes que l'approche LCP pour explorer la connectivité potentielle pour le Lynx en France. C'est dans ce cadre que s'inscrit la présente étude, qui vise à étudier la connectivité potentielle pour le Lynx en France en appliquant et comparant (similitudes et divergences) trois méthodes de modélisation : l'approche du chemin de moindre coût (LCP), l'analyse fondée sur la théorie des circuits (CircuitScape) et le modèle individu-centré spatialement explicite (IBM).

Ce travail s'intègre dans une problématique majeure qu'est la conservation de l'espèce. En effet, le Lynx est inscrit sur plusieurs listes internationales et européennes justifiant la nécessité d'une protection ou la mise en place de mesures de conservation sur l'ensemble de son aire de répartition. En France, il est réparti en trois noyaux localisés au niveau des massifs des Vosges, du Jura et des Alpes (L'équipe animatrice du Réseau, 2016). La situation au sein de ces trois massifs est contrastée. Le Massif du Jura accueille le cœur de l'aire de présence de l'espèce (un peu plus d'une centaine de lynx ; L'équipe animatrice du Réseau, 2016) tandis que dans le Massif des Vosges, le Lynx est dans un état de conservation critique (CROC, 2017) et dans les Alpes, le noyau de population est en cours d'installation (L'équipe animatrice du Réseau, 2016). Le Massif des Vosges occupe quant à lui une position stratégique à l'échelle de l'Europe occidentale en assurant la connexion entre les populations de lynx suisses, françaises et allemandes (Marboutin, 2013 ; Schwoerer et Scheid, 2016). Cependant, la question se pose actuellement d'un manque de connectivité avec le Massif du Jura empêchant les échanges de lynx entre les populations (Zimmermann et Breitenmoser, 2007 ; Assman, 2011 ; Blanc *et al.*, 2015 ; Morand, 2016).

Ainsi, toutes analyses confondues, on s'attend à observer un manque de connectivité potentielle entre le Massif des Vosges et le Massif du Jura, et l'inverse entre le Massif du Jura et les Alpes. La théorie des circuits ainsi que le modèle IBM devraient nous apporter des informations complémentaires et supplémentaires à la LCP en modélisant les corridors alternatifs entre ces deux massifs. A l'issue des analyses, des pistes de mesures de gestion conservatoire sont proposées afin de guider l'interprétation de la connectivité potentielle pour le Lynx en France et contribuer à l'amélioration de l'état de conservation de la population.

II - MATERIEL ET METHODES

II.I Espèce étudiée

Le Lynx boréal (*Lynx Lynx*) est un mammifère discret et élusif appartenant à l'ordre des carnivores et la famille des félidés. Il mesure entre 50 et 75 cm au garrot et pèse une vingtaine de kilogrammes (Stahl et Vandel, 1998 ; Raydelet, 2006). Le Lynx a des exigences spécifiques en matière d'habitat et de proies (Breitenmoser 1997). Il vit majoritairement dans les milieux forestiers où vivent ses proies de prédilection (chevreuils, chamois ; Schadt *et al.*, 2002). Ces grands massifs forestiers sont souvent situés en montagne où l'influence humaine y est moindre. Le Lynx présente par ailleurs des capacités de dispersion et de colonisation limitées (e.g. 25,9 km à 63,1 km ; Zimmermann *et al.*, 2005). Ainsi, la présence de grandes surfaces forestières continues est indispensable à son maintien et à la dispersion des jeunes individus (Kramer Schadt *et al.*, 2005). De plus, la structure du paysage forestier définit la localisation des secteurs où le Lynx peut se reproduire et canalise la dispersion (Kramer Schadt *et al.*, 2005). Actuellement, les principales menaces auxquelles le Lynx est confronté sur l'ensemble de son aire de répartition sont la fragmentation de son habitat ainsi que les risques de collisions routières et ferroviaires (Zimmermann *et al.*, 2005 ; Kramer-Schadt *et al.*, 2004).

Le Lynx est une espèce protégée et menacée d'extinction sur le territoire français (article L.411-1 du Code de l'Environnement). Il est également inscrit sur les listes européennes (Directive Habitat Faune Flore, convention de Berne) et internationales (Convention de Washington, Convention CITES), justifiant la nécessité d'une protection ou la mise en place de mesures de conservation sur l'ensemble de son aire de répartition. En France, le Lynx est présent au niveau des massifs des Vosges, du Jura et des Alpes. La superficie de l'aire de présence régulière de l'espèce est stable depuis 2012-2013 (environ 8 000 km² ; L'équipe animatrice du Réseau, 2016). Le Lynx est présent de manière régulière dans le Jura (6 000 km²) tandis que sa présence est occasionnelle dans les Alpes (1 000 km²) (L'équipe animatrice du Réseau, 2014). Dans le Massif des Vosges où des réintroductions ont été organisées entre 1983 et 1993 (Vandel *et al.*, 2006), l'espèce occupe aujourd'hui moins de 500 km² (Portail Carmen 2017).

Dans le Massif du Jura, les dernières estimations publiées en 2012 évoquaient la présence de 76 à 121 individus (Laurent *et al.*, 2012). Les populations vosgienne et alpine étaient quant à elles plus restreintes : de 19 à 31 lynx dans le Massif des Vosges et de 13 à 21 lynx dans les Alpes (Laurent *et al.*, 2012). Dans le Massif des Vosges, cette estimation doit néanmoins être modérée. En effet, après plusieurs années d'investigations de terrain intensives (CROC, 2014, 2015, 2016, 2017), seuls trois lynx ont été identifiés (L'équipe animatrice du Réseau 2016 ; OCS, 2016 ; CROC, 2017) tandis qu'une dizaine/quinzaine d'indices de présence de lynx tout au plus ont été validés ces dernières

années par le Réseau Loup Lynx dans ce massif. L'état de conservation du Lynx est donc actuellement critique dans le Massif des Vosges (CROC, 2017). D'ailleurs, la population Vosges-Palatinat est considérée par l'IUCN en danger critique d'extinction (Liste Rouge France IUCN, 2017).

II.II Zone d'étude

La présente étude vise à identifier les corridors potentiels pour la dispersion du Lynx entre les trois massifs montagneux où l'espèce est présente en France. Elle a donc été conduite sur une zone d'environ 84 000 km² localisée à l'est de la France et incluant les massifs des Vosges, du Jura ainsi que le nord des Alpes (Fig. 1). Ces trois massifs, bien que proches les uns des autres géographiquement, connaissent une fragmentation des habitats importante (Kramer-Schadt *et al.*, 2004 ; Kramer-Schadt *et al.*, 2005). En effet, la présence de barrières difficilement franchissables, telles que des grandes voies de transport terrestre, fragmente à la fois le cœur de ces massifs et les territoires les séparant (Kramer-Schadt *et al.*, 2004).

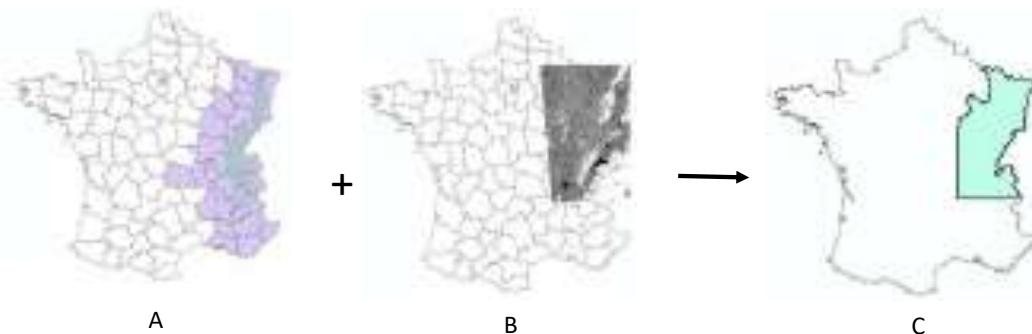


Figure 1 : Étapes de création de la zone d'étude. **(A)** Zone d'étude initiale composée des départements où au moins une maille de présence régulière de Lynx a été observée depuis 1988. **(B)** Zone où les données concernant les collisions de lynx sont disponibles. **(C)** Zone d'étude finale (en bleu clair).

La zone d'étude a été définie en deux temps. Dans un premier temps, les départements où au moins une maille de présence régulière de Lynx (10x10 km) a été observée depuis 1988 ont été sélectionnés grâce aux données de l'Office National de la Chasse et de la Faune Sauvage (ONCFS) disponibles sur le portail de cartographie interactive Carmen (Cartographie du Ministère chargé de l'Environnement ; Carmen 2017). Au total, ce sont 27 départements des régions Grand Est, Bourgogne Franche-Comté et Auvergne Rhône-Alpes qui ont ainsi contribué à définir *la zone d'étude initiale* (Fig. 1A). Puis, compte tenu des données disponibles concernant les collisions de lynx (Blanc *et al.*, 2015 ; Fig. 1B) et nécessaires pour la méthode IBM (voir paragraphe II.III.4.c), la *zone d'étude initiale* a été réduite à l'emprise de Blanc *et al.*, (2015) pour aboutir à *la zone d'étude finale* utilisée pour l'ensemble des analyses de connectivité (Fig. 1C).

II.III Modélisation de la connectivité potentielle pour le Lynx en France

Afin de modéliser la connectivité potentielle pour le Lynx en France, trois méthodes différentes ont été testées : la méthode ‘Least-Cost Path’ (LCP ; Adriaensen *et al.*, 2003), la ‘Théorie des Circuits’ (McRae, 2006 ; McRae *et al.*, 2008) et la modélisation individu-centré spatialement explicite (IBM ‘*individual based model*’ ; Kramer-Schadt *et al.*, 2004 ; 2005 ; 2011). Chacune de ces méthodes nécessite au préalable la construction d’une carte de résistance d’une part, et d’autre part, d’une carte des patchs d’habitat favorable, délimitant les zones de départ et d’arrivée des corridors. La création de la carte de résistance requiert le calcul de variables paysagères. Les patchs d’habitat favorable sont quant à eux définis grâce à une carte d’habitat pour l’espèce étudiée, associée à des règles de décisions pour définir les patchs. La figure 2A illustre les différentes étapes à réaliser en amont des analyses de connectivité et qui sont détaillées ci-après. La résolution choisie pour la réalisation des analyses de connectivité et les cartes associées est de 500x500 m afin de combiner précision des analyses et temps de calculs raisonnables. L’ensemble des calculs et des analyses a été effectué à l’aide des logiciels R Studio (version 3.1.4) et ArcGis (version 10.6).

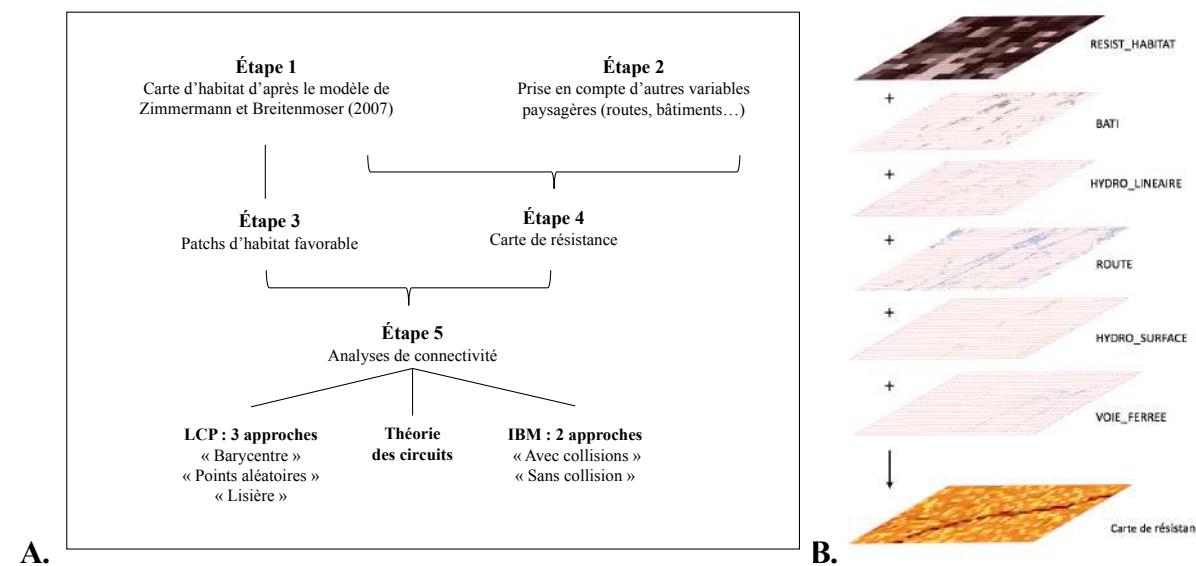


Figure 2 : (A) Schéma récapitulatif des différentes étapes de modélisation de la connectivité potentielle pour le Lynx en France. LCP : méthode du chemin de moindre coût. IBM : modèle individu-centré spatialement explicite. (B) Schéma récapitulatif des six variables paysagères constituant la carte de résistance.

II.III.1 Création de la carte d’habitat du Lynx en France

La carte d’habitat a été créée à partir du modèle d’habitat (HSM ‘*Habitat Suitability Model*’ ; résolution 1x1 km) de Zimmermann et Breitenmoser (2007), initialement construit en testant l’influence de treize variables (choisies sur la base des connaissances existantes sur l’écologie de l’espèce) sur la présence du Lynx. Les données de présence ont été collectées dans le cadre de suivis par radio-télémétrie (localisations) conduits sur 11 lynx entre 1988 et 1998 dans le Massif du Jura. Au

total, 6 282 localisations ont été récoltées (Zimmermann et Breitenmoser, 2007). A l'issue de leur travail de modélisation, ces auteurs ont identifié quatre variables principalement influentes pour le Lynx dans la sélection de son habitat : les arbustes, la forêt, la pente et l'altitude. Le modèle d'habitat *HSM* suivant a ainsi été créé par Zimmermann et Breitenmoser (2007) :

$$\text{Log}(\text{HSM}/(1-\text{HSM})) = -4.5391 + (0.0152 \times \text{ARBUSTE}) + (0.0016 \times \text{ALTITUDE}) + (0.1337 \times \text{PENTE}) + (0.0472 \times \text{FORET})$$

Ce modèle permet d'obtenir dans chaque maille de 1x1 km la probabilité de présence (de 0 à 1) du Lynx. Plus cette probabilité s'approche de 1 et plus l'habitat est favorable au Lynx.

Dans le cadre de la présente étude, les quatre variables ont dans un premier temps été calculées sur l'ensemble de la zone d'étude à la résolution de 1x1 km (même résolution que Zimmermann et Breitenmoser, 2007). Elles ont été calculées de la façon suivante :

- ARBUSTE : le pourcentage de surface d'arbustes a été calculé dans chaque maille grâce aux couches Corine Land Cover® (CLC © DB, 2012). Les codes suivants ont été pris en compte : 321, 322, 323 et 324 (Natural grassland ; Moors and heathland ; Sclerophyllous vegetation ; Transitionnal woodland Shrub)
- FORET : le pourcentage de surface de forêts a été également calculé dans chaque maille grâce aux couches Corine Land Cover® (source : CLC © DB, 2012). Les codes suivants ont été pris en compte : 311, 312, 313 (broad-leaved forest ; coniferous forest ; mixed forest)
- ALTITUDE : l'altitude a été calculée à partir des données de la base de données BD ALTI ® disponible à une résolution de 25x25 m (source : © IGN, 2011). L'altitude moyenne a été calculée dans les mailles de 1x1 km.
- PENTE est issue des données d'élévation de la base de données GTOPO30® disponible à une résolution de 1x1 km (Global 30 Arc-Second Elevation, 1993). Les valeurs d'élévation ont en effet été utilisées pour calculer les valeurs de pente dans chaque maille de 1x1 km de la zone d'étude (boite à outil « slope » sous ArcGIS).

Une fois les quatre variables calculées sur l'ensemble de la zone d'étude, le modèle de Zimmermann et Breitenmoser (2007) a été appliqué afin de créer la carte d'habitat du Lynx. Enfin, la résolution de la carte d'habitat a été affinée à 500x500 m afin d'avoir la même résolution que la carte de résistance. Cette carte d'habitat a servi par la suite à définir les patchs d'habitat favorable et à créer la carte de résistance (Fig. 2B).

II.III.2 Crédation de la carte des patchs d'habitat favorable

Pour définir les patchs, trois règles de décision ont été fixées en partie sur la base de la littérature scientifique sur le sujet. Dans un premier temps, les mailles ont été sélectionnées en tenant compte du seuil de $p > 0,5$ (probabilité de présence supérieure à 0.5 dans la carte d'habitat) défini par Schadt *et al.*, (2002b) comme le seuil d'habitat favorable nécessaire pour que les lynx puissent s'installer et se reproduire. Ensuite, parmi ces mailles, seuls les ensembles de mailles adjacentes dont la superficie était d'au moins 100 km² ont été retenus (Blanc *et al.*, 2015). Cette superficie représente la taille minimale du domaine vital d'une femelle Lynx installée (estimée en Suisse par Breitenmoser *et al.*, 1993), domaine vital depuis lequel les jeunes lynx dispersent pour aller s'installer dans leurs propres domaines vitaux. Pour terminer, une troisième règle a été appliquée : les patchs obtenus ($p>0.5$ et superficie $> 100 \text{ km}^2$) ont été croisés avec l'aire de présence régulière cumulée du Lynx sur la période 1988-2017. Seuls les patchs de 100 km² qui intersectent au moins une maille de présence régulière ont été conservés (patchs entiers, pas seulement les zones d'intersection).

II.III.3 Crédation de la carte de résistance

Dans l'idéal, les cartes de résistance se basent sur des données décrivant l'utilisation du paysage lors de la dispersion des individus (Cushman *et al.*, 2013). Cependant, dans le cas du Lynx en France (comme dans la grande majorité des cas), ces données sont difficiles à obtenir car très peu d'individus sont équipés de collier VHF/GPS. Dans notre étude la résistance a donc été quantifiée à l'aide de la connaissance disponible sur les variables paysagères susceptibles d'influencer les déplacements de l'espèce notamment pendant sa dispersion. La carte de résistance a ainsi été construite en s'appuyant sur la carte d'habitat du Lynx en France (voir II.III.1.) complétée par d'autres éléments paysagers potentiellement importants pour la dispersion et non pris en compte dans le modèle de Zimmermann et Breitenmoser (2007). Le choix de ces variables paysagères complémentaires s'est basé sur des données provenant de la littérature sur l'écologie et la dispersion du Lynx (Zimmermann *et al.*, 2005 ; Zimmermann *et al.*, 2007), des consultations d'experts et des études similaires à la présente étude (Lynx du Canada : Bates *et al.*, 2007 ; Jaguar : Rabinowitz *et al.*, 2010 ; Tigre : Rathore *et al.*, 2012). Finalement, six variables paysagères ont été utilisées afin de créer la carte de résistance :

- L'habitat du Lynx (« HABITAT »)
- Les constructions humaines (« BATI »)
- Les surfaces en eau (« HYDRO_SURFACE »)
- Les cours d'eau naturels et artificiels (« HYDRO_LINEAIRE »)
- Les routes goudronnées (« ROUTE »)

- Les voies ferrées (« VOIE_FERREE »)

Pour chaque variable à l'exception de HABITAT, une valeur de résistance allant de 0 (résistance nulle aux déplacements du Lynx en dispersion) à 10 (résistance très forte aux déplacements du Lynx en dispersion) a été attribuée à partir de dires d'experts (3 experts), méthode couramment utilisée dans les études de connectivité bien que sujette à controverses (Rathore *et al.*, 2012). Pour les variables avec plusieurs catégories (HYDRO_LINEAIRE, ROUTE et VOIE_FERREE), une valeur de résistance a été attribuée pour chacune des catégories par les experts. La valeur de résistance finale pour chaque variable ou catégorie a été la moyenne des valeurs de résistance données par les experts (arrondie à l'entier supérieur ou inférieur ; voir Annexe 1) Une fois ces valeurs de résistance attribuées, elles ont été utilisées pour calculer une note globale de résistance dans chaque maille de 500x500 m, selon les démarches de calcul pour les 6 variables présentées ci-après.

Pour le calcul de la valeur de résistance de BATI, HYDRO_SURFACE, LINEAIRE_SURFACE, ROUTE et VOIE_FERREE, la BD TOPO® a été utilisée (source : © IGN 2017).

a) L'habitat du Lynx

La valeur de résistance de l'habitat dans chaque maille de la zone d'étude a été calculée à partir des probabilités de présence issues de la carte d'habitat du Lynx (voir II.III.1.). Afin de convertir la probabilité de présence du Lynx en valeur de résistance, la formule 1-probabilité de présence a été appliquée. Les valeurs de résistance ainsi obtenues vont de 0 (pour une résistance nulle et une probabilité de présence du Lynx élevée) à 1 (pour une résistance élevée et une probabilité de présence du Lynx faible). Ces valeurs ont ensuite été multipliées par 10 pour les ramener à une valeur de résistance bornée entre 0 et 10. La formule finale pour le calcul de la résistance de HABITAT dans chaque maille i est donc la suivante :

$$\text{HABITAT}_i = (1 - \text{Probabilité de présence du Lynx}_i) \times 10$$

b) Les constructions humaines

Afin de calculer la valeur de résistance des constructions humaines dans chaque maille i (500x500 m), la proportion de surface de constructions humaines a été calculée dans chaque maille i puis multipliée par le coût attribué par dires d'experts (8, Annexe 1). La formule finale pour le calcul de la résistance de BATI dans chaque maille i est donc la suivante :

$$\text{BATI}_i = \frac{\text{Surface BATI } i}{0,25} \times 8$$

(0,25 étant la surface totale d'une maille de 500x500 m soit 0,25 km²)

c) Les surfaces en eau

Pour la variable HYDRO_SURFACE, la proportion de surfaces en eau a été calculée dans chaque maille i puis multipliée par le coût attribué par dires d'experts (5, Annexe 1). La formule finale pour le calcul de la résistance de HYDRO_SURFACE dans chaque maille i est donc la suivante :

$$\text{HYDRO_SURFACE}_i = \frac{\text{Surface HYDRO_SURFACE } i}{0,25} \times 5$$

d) Les cours d'eau naturels et artificiels

Pour les cours d'eau, leur nature (artificielle ou naturelle) ainsi que leur largeur ont été prises en compte, conduisant à 6 catégories j de HYDRO_LINEAIRE (voir Annexe 1). La densité de cours d'eau pour chaque catégorie j a également été prise en compte dans chaque maille i (km/km^2). Finalement, la valeur de résistance de HYDRO_LINEAIRE dans chaque maille i a été calculée grâce à une moyenne pondérée tenant compte de la nature, de la largeur et de la densité des cours d'eau :

$$\text{LINEAIRE HYDRO}_i = \frac{\sum_i (\text{Valeurs de résistance LINEAIRE_HYDRO } j \times \text{densité LINEAIRE_HYDRO } j)}{\sum \text{Valeurs de résistance LINEAIRE_HYDRO}}$$

Puis ces valeurs ont été bornées entre 0 et 10 à l'aide d'un produit en croix.

e) Les routes goudronnées

Pour la variable ROUTE, la nature des routes (autoroutes, routes à deux chaussées, routes à une chaussée) ainsi que l'intensité du trafic (faible, moyen, fort) ont été prises en compte, conduisant à 7 catégories j de ROUTE (voir Annexe 1). La densité de routes pour chaque catégorie j a également été prise en compte dans chaque maille i (km/km^2). Finalement, la valeur de résistance de ROUTE dans chaque maille i a été calculée grâce à une moyenne pondérée tenant compte de la nature, de l'importance et de la densité de routes :

$$\text{ROUTE}_i = \frac{\sum_i (\text{Valeurs de résistance ROUTE } j \times \text{densité ROUTE } j)}{\sum \text{Valeurs de résistance ROUTE}}$$

Puis, ces valeurs ont été bornées entre 0 et 10 à l'aide d'un produit en croix.

f) Les voies ferrées

Concernant la variable VOIE_FERREE, deux catégories j ont été distinguées : les LGV (Ligne Grande Vitesse) d'une part, et les voies ferrées principales et de service d'autre part (voir Annexe 1). La densité de VOIE_FERREE a également été prise en compte dans chaque maille i (km/km^2). Finalement, la valeur de résistance de VOIE_FERREE dans chaque maille i a été calculée grâce à une moyenne pondérée tenant compte de la nature et de la densité de voies ferrées :

$$\text{VOIE_FERREE}_i = \frac{\sum_i (\text{Valeurs de résistance VOIE_FERREE } j \times \text{densité VOIE_FERREE } j)}{\sum \text{Valeurs de résistance VOIE_FERREE}}$$

Puis, ces valeurs ont été bornées entre 0 et 10 à l'aide d'un produit en croix.

g) Carte de résistance

Pour obtenir la carte de résistance finale, les valeurs de résistances calculées pour les 6 variables ont été sommées dans chaque maille i (Fig. 2B) :

Valeur totale de résistance $i = \text{HABITAT}_i + \text{BATI}_i + \text{ROUTE}_i + \text{HYDRO_SURFACE}_i + \text{HYDRO_LINEAIRE}_i + \text{voie_FERREE}_i$

Ces valeurs peuvent aller de 0 (pas de résistance aux déplacements des lynx) à 52 (forte résistance aux déplacements des lynx).

II.III.4 Analyses de la connectivité potentielle

Dans le cadre de cette étude, un travail approfondi de recherches bibliographiques a été conduit afin de réaliser une synthèse comparative des trois méthodes d'analyse utilisées : la méthode LCP, la théorie des circuits et le modèle IBM. Une description des méthodes est présentée ci-dessous. Un tableau récapitulatif détaillé est également proposé en Annexe 3 présentant leurs avantages et leurs inconvénients.

a) Méthode ‘Least-Cost Path’

La méthode LCP est une analyse du chemin de moindre coût (Adriaensen *et al.*, 2003 ; Driezen *et al.*, 2007). Cette méthode calcule le chemin ayant le coût cumulatif le plus faible entre deux patchs d'habitat favorable. Elle suppose cependant que l'individu ait une connaissance parfaite de son paysage, ce qui n'est pas souvent le cas (Adriaensen *et al.*, 2003 ; Pinto et Keitt, 2009 ; Cushman *et al.*, 2013 ; Annexe 3). Dans le cadre de la présente étude, les chemins de moindres coûts ont été obtenus sous SIG en utilisant les fonctions « Least cost Path » de la boîte à outil « Landscape connectivity » du logiciel ArcGis. Trois approches ont été utilisées pour sélectionner les lieux de départ et d'arrivée des corridors et ce, afin de tester leurs influences dans la quantification de la connectivité. Pour les trois approches, les points de départ et d'arrivée sont situés à l'intérieur des patchs d'habitat favorable. La première approche a consisté à prendre le barycentre de chacun des patchs (LaRue, 2005). Pour la seconde approche, 100 points ont été pris aléatoirement parmi tous les patchs (Bond *et al.*, 2017). Enfin, la troisième approche a consisté à prendre des points en bordure des patchs, espacés de 15 km les uns des autres (Cushman *et al.*, 2009). Cette distance de 15 km a été choisie comme compromis entre temps de calcul et précision des résultats.

b) Méthode « Théorie des Circuits »

Les flux de dispersion issus de la méthode de la théorie des circuits électriques ont été modélisés à l'aide du logiciel « CircuitScape » qui utilise les algorithmes de la théorie des circuits électriques (McRae, 2006 ; McRae *et al.*, 2008). L'analyse de la théorie des circuits électrique utilise l'analogie

entre le mouvement des individus à travers un paysage et le mouvement du courant à travers un circuit électrique : un plus grand nombre de chemins de déplacement entre les nœuds améliore les flux entre eux (McRae *et al.*, 2008). Ainsi, chaque nœud représente un patch d'habitat favorable et chaque ligne représente les connexions entre ces patchs (Avon et Bergès, 2014 ; Annexe 2). La théorie des circuits permet de déceler les zones où les déplacements sont les plus faciles entre deux patchs d'habitat favorable en analysant toutes les routes possibles au sein d'un paysage donné (McRae et Shah, 2009). Les zones présentant une plus grande résistance aux déplacements des individus se voient attribuer un courant plus faible dans le circuit. Dans notre cas, les corridors ont été modélisés par paire de patchs (mode '*pairwise*') du logiciel « CircuitScape » où chaque maille est connectée à ses huit mailles voisines. Il en ressort une matrice où chacune des mailles a une valeur reflétant la probabilité d'emprunt du chemin dans le paysage : plus la valeur au sein de la maille est élevée et plus la probabilité d'utilisation de cette maille pour la dispersion est élevée (Walpole *et al.*, 2012).

c) Modèle individu-centré spatialement explicite

Le modèle individu-centré spatialement explicite utilisé a été précédemment élaboré afin de simuler le mouvement de dispersion du Lynx en France (Kramer-Schadt *et al.*, 2004 ; Kramer-Schadt *et al.*, 2011). Le modèle IBM a par ailleurs été développé sous R par Sarah Bauduin avec le package NetLogoR (<http://netlogor.predictiveecology.org/>). Ce modèle a l'avantage de pouvoir incorporer des réponses comportementales qui varient dans l'espace et dans le temps (Annexe 3). Ainsi, il prend en considération le comportement supposé d'un individu lorsqu'il se déplace dans le paysage (ici la carte de résistance) en fonction du temps.

Pour l'application du modèle, des règles ont été définies pour les déplacements des lynx dans les mailles de 500x500 m sur la zone d'étude :

- Le déplacement des individus est conditionné par les valeurs de chaque maille de la carte de résistance.
- Une probabilité de direction allant de 0.9 (en face de l'individu) à 0.1 (derrière lui) est également attribuée à chaque maille afin d'intégrer dans le modèle une corrélation dans les angles successifs de déplacement (c'est-à-dire le fait qu'un individu va avoir tendance, d'un pas à l'autre, à suivre une direction similaire) (Fig.3).
- Chaque individu peut effectuer, s'il survit, jusqu'à 5 000 pas (un pas représentant le déplacement d'une maille à l'autre) depuis sa position initiale avant que le modèle ne s'arrête et redémarre une nouvelle simulation.
- Si un individu sort de la zone d'étude, il meurt.

Ces règles sont définies de manière à être le plus proche possible de la réalité, afin que les corridors identifiés par la méthode soient les corridors potentiels pour la population de Lynx actuelle. Enfin,

pour chacune des 20 répliques, un échantillonnage aléatoire de 10 000 lynx préalablement « lâchés » dans chacune des mailles de 500x500 m des patchs d'habitat favorable a été effectué.

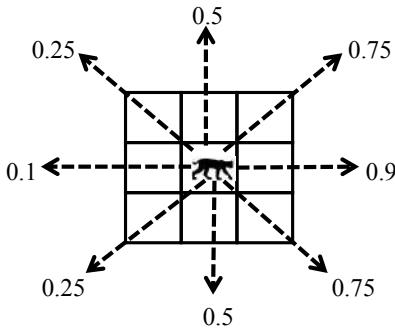


Figure 3 : Schéma des différentes probabilités de direction du Lynx concernant les règles de déplacement du modèle IBM. Pour un pas de temps, le Lynx à une probabilité de 0,9 d'aller dans la maille se trouvant en face de lui et une probabilité de 0,1 d'aller dans la maille se trouvant derrière lui. La probabilité de faire une rotation de 90 degrés est de 0,5.

En plus de la carte de résistance, le modèle IBM permet de prendre en compte la probabilité de mortalité par collision au sein de chaque maille. Le modèle IBM a ainsi été utilisé avec et sans cette probabilité de collision. La carte finale obtenue avec le modèle IBM informe sur la connectivité en renseignant dans chacune des mailles le nombre de fois où un lynx (quel qu'il soit) est passé. Au total, vingt répliques du modèle IBM ont été réalisés (avec et sans collision) pour estimer la robustesse des résultats.

II.III.5 Corridors potentiels et zones à enjeux pour le Lynx en France

Afin de pouvoir identifier et caractériser visuellement les corridors potentiels de déplacement pour le Lynx en France, la méthode proposée par Bond *et al.*, (2017) pour un travail similaire sur les Gnous en Afrique a été appliquée. Ainsi, les cartes issues de la théorie des circuits et du modèle IBM sans collision ont été combinées (additionnées) afin d'obtenir une seule carte cumulant les corridors modélisés avec les deux méthodes. Les valeurs au sein de chaque maille des deux cartes ont été bornées entre 0 et 1 avant d'être additionnées entre elles afin d'obtenir une carte unique avec des valeurs par maille allant de 0 à 2. La carte obtenue permet de visualiser et délimiter les zones du paysage présentant la plus forte probabilité d'être un corridor (Bond *et al.*, 2017). Plus la valeur au sein des mailles est élevée et plus la méthode IBM et la méthode théorie des circuits s'accorde sur la potentialité d'un corridor (en revanche lorsque la valeur est de 0, les deux méthodes s'accordent à dire qu'il n'y a pas de corridor).

III - RESULTATS

III.I Habitat du Lynx en France, patchs d'habitat favorable et carte de résistance

La carte d'habitat illustre la probabilité de présence du Lynx au sein de la zone d'étude (Fig. 4A). Elle met en évidence trois grandes entités d'habitat favorable que sont les massifs montagneux de l'est de la France, à savoir les massifs des Vosges, du Jura et des Alpes (vert foncé).

A partir de cette carte d'habitat et des données de présence régulière du Lynx (voir Fig. 1A), quatre patchs d'habitat favorable ont été identifiés (Fig. 4B). Le patch 1 d'une superficie de 4 062 km² recouvre quasiment tout le Massif des Vosges. Le patch 2 (186 km²) se situe au nord-ouest du Massif du Jura, en dehors du massif et en limite de l'aire de présence régulière du Lynx. Le patch 3 (2 765 km²) occupe quant à lui la moitié sud du Massif du Jura. La partie nord du Massif du Jura n'est pas concernée par un patch d'habitat favorable du fait de l'absence de patch d'habitat favorable de 100 km² minimum et ce, malgré la présence régulière de lynx. Enfin, le patch 4 (5 840 km²) est localisé dans le nord du Massif des Alpes.

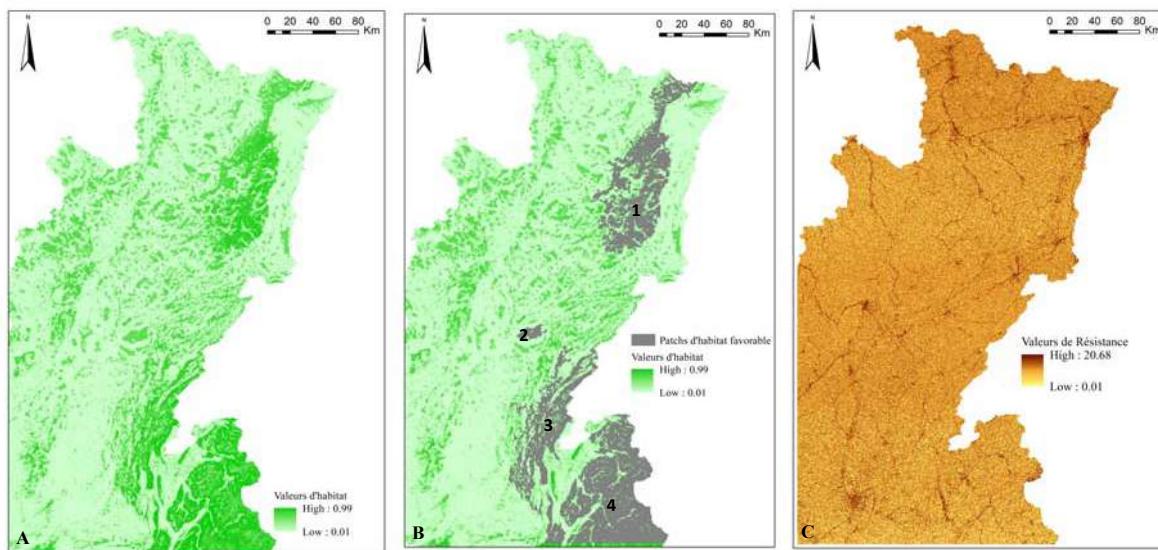


Figure 4 : (A) Carte d'habitat du Lynx : les fortes valeurs de probabilité de présence de lynx sont illustrées en vert foncé tandis que les faibles valeurs sont en vert clair. (B) Carte des patchs d'habitat favorable aux lynx créés (1 : patch localisé dans le Massif des Vosges ; 2 : patch localisé à l'ouest du Massif du Jura ; 3 : patch localisé dans le Massif du Jura ; 4 : patch localisé dans le Massif des Alpes). (C) Carte de résistance aux déplacements des lynx : les fortes valeurs (en marron foncé) représentent une forte résistance aux déplacements des lynx tandis que les faibles valeurs (en jaune clair) illustrent une faible résistance.

La carte de résistance présente un gradient de résistance où les fortes valeurs (en marron foncé) représentent une forte résistance aux déplacements des lynx tandis que les faibles valeurs (en jaune clair) illustrent une faible résistance (Fig. 4C). Les principales villes et les principaux axes routiers

(marron foncé) se distinguent ainsi du reste de la carte (éléments du paysage à forte résistance pour les déplacements des lynx).

III.II Analyses de la connectivité potentielle

Les trois méthodes de modélisation des corridors conduisent à des cartes de connectivités potentielles différentes entre les quatre patchs et donc les massifs des Vosges, du Jura et des Alpes. Avec la méthode LCP, des corridors précis et bien délimités sont obtenus (lignes rouges ; Fig. 5). En revanche, avec la méthode de la théorie des circuits et le modèle IBM, l'information est plus diffuse puisqu'il n'y a pas de corridor net qui se dessine (Fig. 6). La méthode de la théorie des circuits (Fig. 6A) fait quant à elle ressortir davantage de zones à forte connectivité que la méthode IBM (Fig. 6B et C).

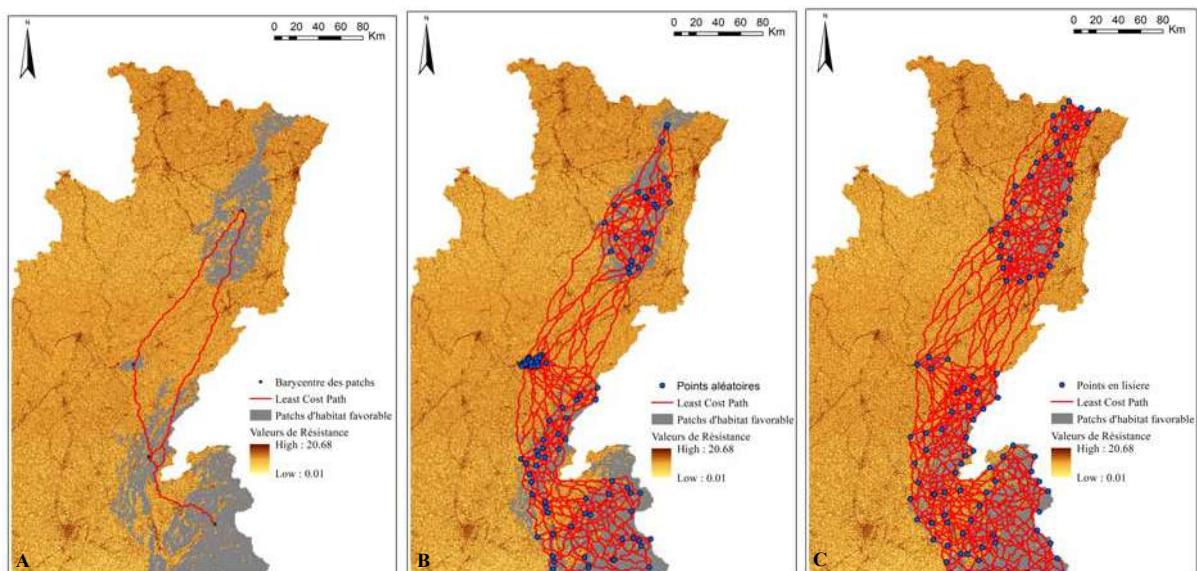


Figure 5 : Cartes de la connectivité potentielle pour le Lynx en France obtenues avec la méthode du chemin de moindre coût (LCP). **(A)** Approche des barycentres : les points de départ et d'arrivée sont les barycentres de chacun des patchs d'habitat favorable. **(B)** Approche des points aléatoires : 100 points de départ et d'arrivée répartis de manière aléatoire dans les patchs d'habitat favorable. **(C)** Approche lisière : 100 points de départ et d'arrivée répartis en bordure des patchs d'habitat favorable en prenant un point tous les 15 km.

III.II.1 Analyse du chemin de moindre coût (LCP)

Concernant l'analyse du chemin de moindre coût, l'approche '*Barycentre*' met en évidence six corridors (Fig. 5A). Ces corridors relient entre eux les patchs 1, 2, 3 et 4. Ces mêmes corridors ressortent également avec les approches '*Points aléatoires*' et '*Lisières*' (Fig. 5B et 5C) mais cette fois-ci au sein de réseaux de plusieurs centaines de corridors. Bien que ces deux dernières approches présentent le même nombre de points de départ et d'arrivée (100), le réseau de corridors contient moins de corridors avec l'approche '*Points aléatoires*' (207 corridors ; Fig. 5B) qu'avec l'approche

'Lisières' (573 corridors ; Fig. 5C). De plus, ces réseaux de corridors relient non seulement les 4 patchs entre eux mais ils créent également de la connectivité à l'intérieur des patchs et donc au sein des trois massifs.

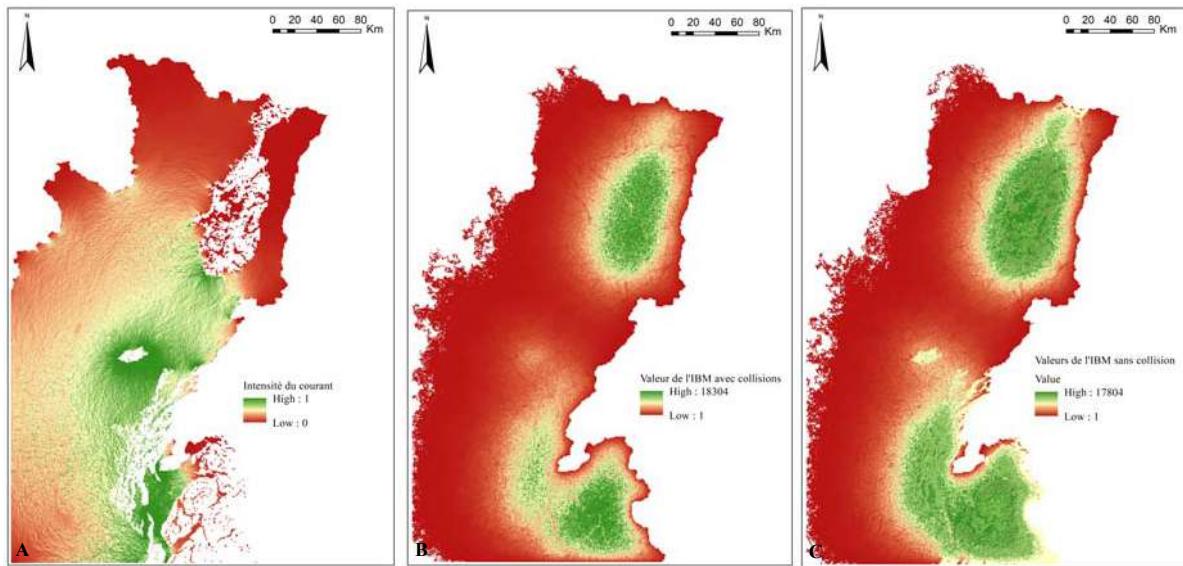


Figure 6 : Cartes de la connectivité potentielle pour le Lynx en France obtenues avec **(A)** la méthode de la théorie des circuits : les fortes valeurs de courant (vert) représentent une forte probabilité que les lynx empruntent les corridors identifiés. **(B)** le modèle IBM incluant la probabilité de mortalité par collisions (20 simulations de 5 000 pas) : plus la couleur s'approche du vert et plus le nombre de passages de lynx est important. **(C)** le modèle IBM sans les probabilités de mortalité par collisions.

III.II.2 Théorie des circuits

Avec la théorie des circuits, les corridors sont représentés sous forme de flux de dispersion, ce qui ne permet pas de les dénombrer. Ces flux de dispersion se dessinent entre les patchs 1, 2, 3 et 4 (Fig. 6A). Ils irradiient depuis les bords des patchs d'habitat favorable et ne s'étendent donc pas dans les massifs. Des zones avec un fort courant peuvent être observées au sud du patch 1 (sud du Massif des Vosges), tout autour du patch 2, à l'ouest et au sud-est du patch 3 (moitié sud du Massif du Jura) ainsi qu'au nord du patch 4 (nord des Alpes). L'intensité de courant semble être la plus importante tout autour du patch 2 ainsi que dans les zones situées entre la moitié sud du Massif du Jura (patch 3) et les Alpes (patch 4).

III.II.3 Modèle IBM

Avec le modèle IBM avec ou sans prise en compte des collisions, ce sont également des flux de dispersion qui se dessinent entre les patchs mais cette fois-ci uniquement entre les patchs 2, 3 et 4 (Fig. 6B et C). Il n'y a en effet pas de connectivité potentielle apparente entre le sud du Massif des Vosges et la moitié sud du Massif du Jura. Les cartes de connectivité potentielle produites avec et sans probabilité de mortalité par collisions présentent une nette différence : l'approche sans collision

montre des valeurs de connectivité plus fortes en particulier entre le Massif du Jura et les Alpes. Les valeurs de connectivité sont aussi plus élevées autour des patchs avec cette approche. Enfin, comme la LCP, les flux de dispersion s'étendent à l'intérieur des patchs avec le modèle IBM du fait des lieux de départ et d'arrivée des lynx définis au sein des patchs.

III.III Description des corridors potentiels et des éléments fragmentants majeurs issus de la méthode LCP (approche ‘Barycentre’), de la théorie des circuits et du modèle IBM (sans collision)

III.III.1 Corridors et éléments fragmentants majeurs entre les massifs des Vosges (patch 1) et du Jura (patchs 2 et 3)

Seules la méthode LCP et la théorie des circuits ont conduit à l'identification de corridors entre le Massif des Vosges (patch 1) et le Massif du Jura (patchs 2 et 3). La LCP (approche ‘Barycentre’) conduit à un corridor de 129 km de long entre les patchs 1 et 3 et un corridor de 101 km de long entre les patchs 1 et 2. Ces deux corridors traversent l'autoroute A36 entre les communes de Colombier-Fontaine et Etouvans dans le Doubs (25 ; Fig. 7A). Le flux de dispersion obtenu avec la théorie des circuits mesure quant à lui une trentaine de kilomètres de large. Il est compris entre la ville de Vesoul à l'ouest (70) et la ville de Montbéliard à l'est (25 ; Fig. 7A). Avec cette méthode, il est possible d'identifier certaines « zones d'évitement » (i.e. faible connectivité) au sein du flux de dispersion. L'autoroute A36 par exemple qui assure la liaison entre Besançon, Belfort, Dole, Montbéliard et Mulhouse est évitée dans sa partie terminale. Cela se traduit par des valeurs de courant bien moins importantes le long de l'autoroute A36 (en jaune sur la Figure 7A) puisque le courant se heurte à une grande résistance. En revanche, le flux de dispersion traverse la N57, nationale ayant un très fort trafic ainsi que le fleuve du Doubs.

III.III.2 Corridors et éléments fragmentants entre les massifs du Jura (patch 3) et des Alpes (patch 4)

Les trois méthodes d'analyse de la connectivité potentielle ont abouti à des corridors ou des flux de dispersion entre ces 2 massifs. Avec l'approche LCP, un corridor relie le sud du Massif du Jura (sud du patch 3) au nord du Massif des Alpes (nord du patch 4 ; Fig. 7B). Ce corridor part de Léaz (01) pour aller à Veyrier-du-Lac en Haute-Savoie (74), contournant Annecy (74) par le nord. Il mesure 29,11 km de long et traverse deux autoroutes : l'A40 d'une part et l'A41 d'autre part. Le flux de dispersion modélisé avec la théorie des circuits entre les massifs du Jura et des Alpes a une de largeur de 62,21 km. Il se situe entre Chambéry (73) et Annemasse en Haute-Savoie (74 ; Fig. 7C). Enfin, le flux de dispersion issu de la méthode IBM sans collision est quant à lui moins large et moins concentré

que celui de la théorie des circuits (Fig. 7D). En effet, il ne mesure que 39,92 km de large et se situe entre les villes de Motz et Cusy (74). Ces flux de dispersion traversent tous deux l'autoroute A41 qui relie Aix-les-Bains et Annecy (74 ; Fig. 7C et 7D).

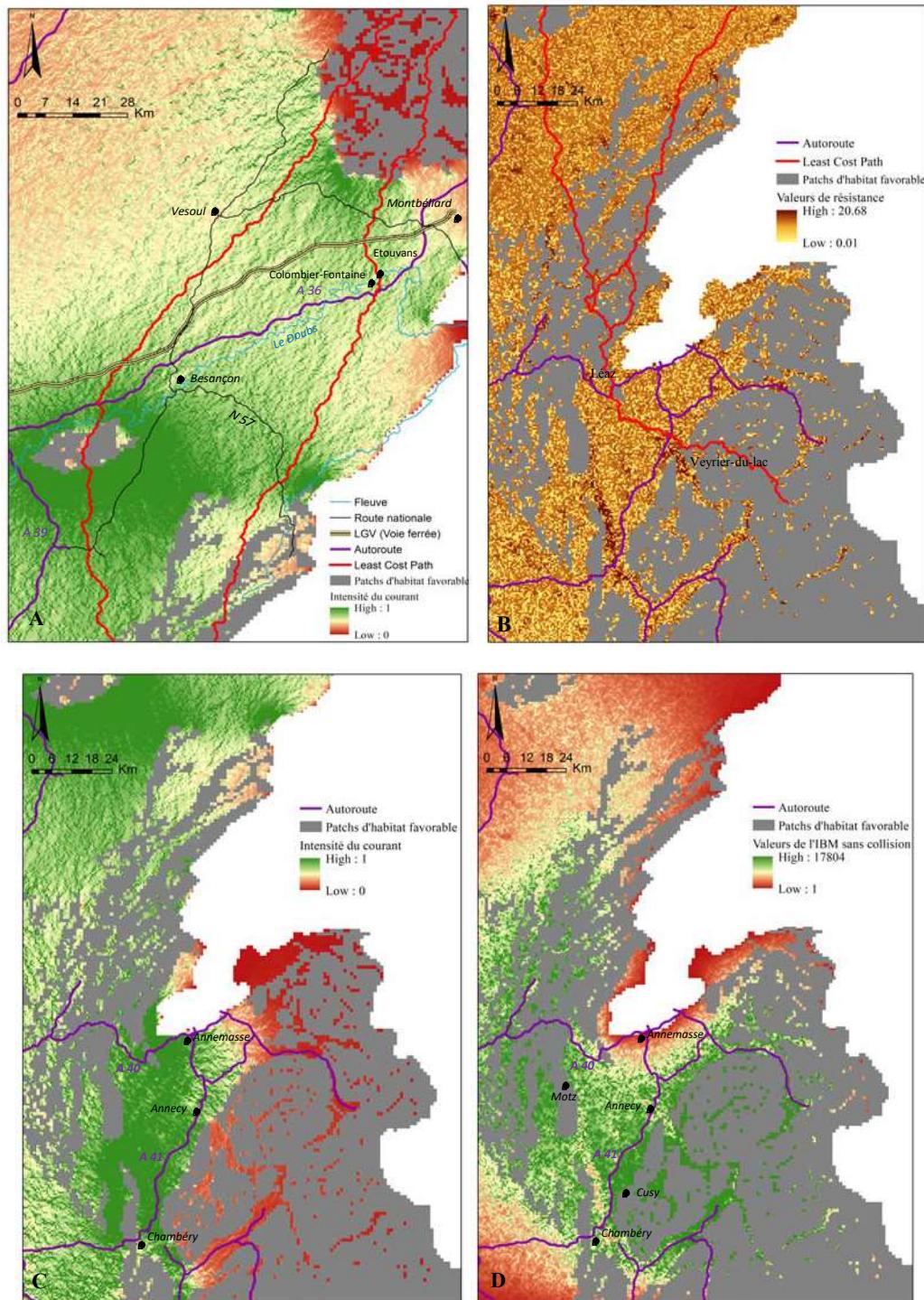


Figure 7 : Zoom sur certains corridors potentiels et les éléments fragmentants majeurs associés issus des analyses de connectivité. **(A)** Zoom entre les massifs des Vosges (patch 1) et du Jura (patch 2 et 3) avec la méthode LCP (*approche 'Barycentre'*) et la théorie des circuits. **(B)** Zoom entre les massifs du Jura (patch 3) et des Alpes (patches 2 et 3) avec la méthode LCP (*approche 'Barycentre'*), **(C)** avec la théorie des circuits et **(D)** avec le modèle IBM (sans collision) (source : BD TOPO® © IGN-2017).

III.IV Corridors potentiels et zones à enjeux pour le Lynx en France

La Figure 8 indique qu'il n'existe pas la même information concernant la connectivité potentielle entre le Massif des Vosges (patch 1) et le Massif du Jura (patchs 2 et 3). Il existe en revanche des points de convergence entre les trois méthodes pour la connectivité potentielle entre la moitié sud du Massif du Jura (patch 3) et le patch d'habitat favorable localisé en limite nord-ouest de ce massif (patch 2). Pour terminer, les trois méthodes d'analyse mettent en évidence l'existence d'une connectivité potentielle entre les massifs du Jura (patch 3) et des Alpes (patch 4) au travers la présence de corridors ou de flux de dispersion.

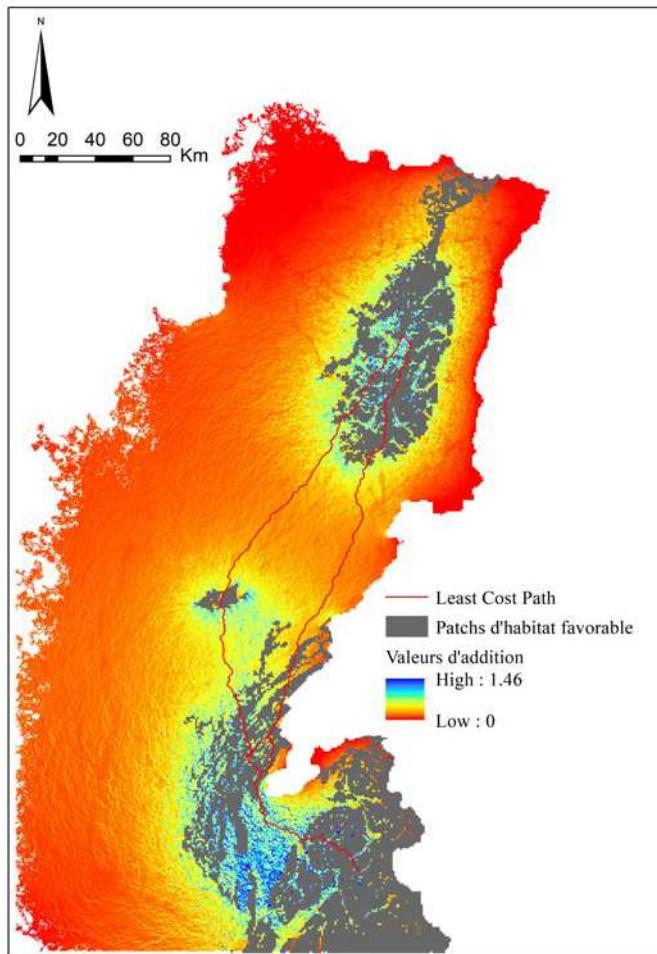


Figure 8 : Carte des secteurs à forts enjeux en termes de connectivité. Cette carte représente l'addition des valeurs de connectivité issues de la théorie des circuits et du modèle IBM sans collision. La carte de la méthode du chemin de moindre coût (*'approche barycentre'*) a également été superposée afin de pouvoir distinguer visuellement les secteurs à forts enjeux en termes de connectivité communs aux trois méthodes.

IV - DISCUSSION

IV.I Connectivité potentielle pour le Lynx en France

Dans la présente étude, trois méthodes de modélisation de la connectivité potentielle pour le Lynx en France ont été testées : la méthode du chemin de moindre coût (LCP), la théorie des circuits et la modélisation individu-centré spatialement explicite (IBM). La LCP figure parmi les méthodes les plus utilisées dans la littérature pour estimer la connectivité à large échelle (Coulon *et al.*, 2015) et ce, notamment chez les grands carnivores. Cependant, en raison de la prise de conscience croissante des limites de cette méthode, des études basées sur des calculs plus réalistes, comme la théorie des circuits et l'IBM, se sont développées ces dernières années (e.g. Carroll *et al.*, 2011 ; Walpole *et al.*, 2012 ; Avon et Bergès, 2016). Les trois méthodes utilisées pour le Lynx en France n'apportent pas la même information concernant la connectivité potentielle et la présence de corridors ou de flux de dispersion entre le Massif des Vosges (patch 1) et la moitié sud du Massif du Jura (patchs 2 et 3). Seule la LCP permet d'identifier des corridors à tracés précis entre ces deux massifs (2 corridors avec l'approche '*Barycentre*' et plusieurs dizaines avec les approches '*Points aléatoires*' et '*Lisières*'). Une portion du corridor observé entre les patchs 1 et 3 avec la méthode LCP fait partie d'un corridor identifié dans d'autres travaux portant sur le Lynx : le corridor « Franc-Comtois », reliant le nord du Jura et le sud du Massif des Vosges (Zimmermann et Breitenmoser, 2007 ; Assmann, 2011 ; Blanc *et al.*, 2015). Zimmermann et Breitenmoser (2007) et Blanc *et al.*, (2015) ont identifié ce corridor avec la méthode LCP mais avec des méthodes différentes concernant la caractérisation des patchs d'habitat favorable, associées à des lieux de départ et d'arrivée différents. Assmann (2011) a quant à elle utilisé une autre méthode dite de « dilatation-érosion ». Ces différences méthodologiques ont conduit à des longueurs différentes de corridors : 23,9 km pour Zimmermann et Breitenmoser (2007), 30 km (Assmann, 2011), 83 km pour Blanc *et al.*, (2015), 97 km avec l'approche « *Lisière* » et 129 km avec l'approche « *Barycentre* » dans le cas de la présente étude. Il existe une portion commune à ces corridors à partir de la rivière du Doubs à Colombier-Fontaine (25) jusqu'au sud du Massif des Vosges où ces corridors semblent passer aux mêmes endroits. Cette portion commune traverse l'autoroute A36 entre les communes de Colombier-Fontaine (25) et Etouvans (25), un large fleuve (*Le Doubs*) ainsi qu'une LGV. Plus au sud, les corridors identifiés dans cette étude traversent également la N57 (25). A noter, un second corridor identifié par Assmann (2011), le corridor de « Sundgau » (45 km), reliant le Jura alsacien et le sud du Massif des Vosges *via* le Haut-Rhin et traversant l'A36 entre Belfort (90) et Mulhouse (68), n'a pas été mis en évidence ici. De plus, aucun corridor ne ressort clairement avec la « mise en commun » de la méthode de la théorie des circuits et du modèle IBM sur cette zone. Dans ce contexte, il apparaît difficile de conclure quant à l'existence actuellement d'une connectivité

potentielle pour le Lynx entre le patch 1 et les patchs 2 et 3. Or, il s'agit d'une zone à fort enjeu en termes de conservation pour le Lynx à l'échelle nationale (connectivité entre les noyaux de population jurassien et vosgien de lynx ; Marboutin, 2013 ; Schwoerer et Scheid, 2016). Il existe des points de convergence entre les trois méthodes pour la connectivité potentielle entre le patch d'habitat favorable localisé en limite nord-ouest du Massif du Jura (patch 2) et la moitié sud de ce massif (patch 3). Deux corridors sont ainsi identifiés avec la méthode LCP tandis qu'un flux de dispersion est observé avec la « mise en commun » des deux autres méthodes sur cette zone. Les patchs d'habitat favorable n'étant pas les mêmes que ceux des autres études conduites, aucune autre étude n'a mis en évidence ces corridors ou ce flux de dispersion.

Enfin, les trois méthodes d'analyse de la connectivité mettent en évidence l'existence d'une connectivité potentielle entre les massifs du Jura (patch 3) et des Alpes (patch 4) au travers la présence de corridors ou de flux de dispersion. Cette zone représente donc probablement un secteur à fort enjeu de connectivité potentielle entre les noyaux de population jurassien et alpin de lynx. D'ailleurs, Zimmermann *et al.*, (2007) ont identifié un corridor de 27,3 km entre les massifs du Jura et de Salève dans les Préalpes (74). Ce corridor ne semble pas prendre le même itinéraire que celui mis en évidence dans cette étude (LCP approche « *Barycentre* ») qui traverse les autoroutes A40 et A41, autoroutes connues pour des cas de collision de lynx (Gaillard *et al.*, 2012).

IV.II Points forts et limites des trois méthodes d'analyse

Un des avantages de la méthode LCP est de fournir des corridors bien définis, permettant de localiser précisément les secteurs à enjeux, et donc potentiellement de faciliter les prises de décision des gestionnaires en termes de mesures de gestion conservatoire (Adriaensen *et al.*, 2003). Cependant, comme les résultats obtenus avec cette méthode ne concordent pas toujours avec les deux autres méthodes (entre les massifs des Vosges et du Jura notamment), la question se pose de la fiabilité de ces corridors et donc de la pertinence de la mise en place de mesures de gestion pour améliorer les déplacements des lynx entre les massifs. Il paraît par ailleurs peu probable que les déplacements des lynx entre les massifs se limitent à un ou deux corridors et qu'il n'y ait pas de corridors alternatifs utilisés. En revanche, la théorie des circuits et l'IBM sont deux méthodes présentant l'avantage de pouvoir prioriser les mailles par rapport à leur importance en termes de connectivité (valeurs de connectivité continues ; McRae *et al.*, 2008), à l'inverse de la LCP (valeurs binaires ; 0 = absence de corridor ; 1 = présence de corridor ; Carroll *et al.*, 2011). Aussi, la théorie des circuits et le modèle IBM sont en mesure d'identifier des secteurs sans connectivité entre deux patchs d'habitat favorable, contrairement à la LCP qui trouvera toujours un chemin, même si le paysage est très résistant à la dispersion. De plus, de par son mode de calcul, la LCP suppose qu'un individu privilégiera la traversée

d'un paysage de très mauvaise qualité si le chemin est le plus court (et donc le coût cumulatif le plus bas) plutôt que la traversée d'un très long paysage de bonne qualité. Ce mode de choix de déplacement ne semble pas très réaliste pour le Lynx qui est une espèce sensible à son habitat (Weaver *et al.*, 1996 ; Crooks, 2002). La théorie des circuits semble donner de meilleurs résultats que la LCP (Moore *et al.*, 2011). Cependant, les estimations basées sur la théorie des circuits n'intègrent pas de règles de mouvement réalistes sur le plan comportemental ce qui peut biaiser la précision avec laquelle les flux de dispersion sont modélisés. Finalement, en prenant en compte une diversité de paramètres liés à l'espèce (paramètres biologiques, probabilité de collision etc.) et en intégrant des règles de mouvement sur le plan comportemental (souvenirs des chemins empruntés, choix de trajectoire, etc.), le modèle IBM est plus complet dans son évaluation de la connectivité et à ce titre, pourrait modéliser plus finement la connectivité, comme cela a été montré dans d'autres études (Coulon *et al.*, 2015 ; Palmer *et al.*, 2011). Bien que plus complet, il nécessite néanmoins des temps de calcul beaucoup plus longs et un grand nombre de paramètres et de connaissances sur la biologie de l'espèce (Kool *et al.*, 2013 ; Coulon *et al.*, 2015). Cette méthode de modélisation mériterait d'être approfondie pour évaluer la connectivité potentielle et définir des mesures de conservation adaptées.

IV.III Pistes d'améliorations des analyses de la connectivité

L'emprise spatiale de la zone d'étude

L'emprise de la zone d'étude semble influencer fortement les résultats de modélisation de corridors. Dans notre cas, comme les massifs du Jura et des Alpes s'étendent en Suisse, l'inclusion de ce pays dans la zone d'étude permettrait d'identifier de nouveaux patchs d'habitat favorable, et par conséquent de nouveaux corridors, ce qui s'approcherait davantage de la réalité. De la même manière, il serait nécessaire d'intégrer les régions où le Lynx est/a été présent en Allemagne (Forêt du Palatinat, Forêt noire, etc.). Cependant, une difficulté reposera sur l'accès aux données environnementales dans les pays limitrophes. Certaines données restent aussi à stabiliser en France comme les données de collision pour lesquelles une portion du Massif des Alpes ne dispose pas d'informations. La prise en compte d'une zone d'étude plus grande permettrait d'avoir une vision plus globale, à l'échelle uest-européenne, des enjeux en termes de connectivité pour le Lynx.

Le modèle habitat

Le modèle d'habitat utilisé dans le cadre de cette étude est celui de Zimmermann et Breitenmoser (2007), développé dans le Jura suisse grâce à des données collectées sur des lynx résidents et projeté en France sur la zone étudiée. La transposition de ce modèle en France dans le cadre d'une étude sur la connectivité présente une limite : le modèle n'a pas été construit à partir de données de lynx suivis

sur la zone étudiée en France. Or, des différences dans la sélection de l'habitat par le Lynx entre le Jura suisse et la France pourraient exister et être à l'origine de biais dans l'estimation des probabilités de présence lors de la transposition du modèle suisse en France (Barbosa *et al.*, 2009 ; Peterson *et al.*, 2007). Un nouveau modèle d'habitat devrait donc être créé pour le Lynx en France. En fonction de la disponibilité et de l'accessibilité de ce type de données en France, une possibilité serait d'utiliser les données de présence du Lynx de l'ONCFS en considérant la détectabilité de l'espèce pour améliorer les estimations des probabilités de présence (e.g. Louvrier *et al.*, 2018).

La carte de résistance

La carte de résistance créée à partir du modèle d'habitat et de données environnementales présente une limite : les données environnementales ont été notées par dires d'experts. En effet, bien que la prise en compte de l'opinion d'experts soit une méthode couramment utilisée dans les analyses de connectivité visant à définir des corridors, elle reste sujette à controverses (Rathore *et al.*, 2012). Elle suppose en effet que les experts « pensent » comme le Lynx et ont une connaissance parfaite des barrières impactant l'espèce, ce qui est difficilement possible et peut être source de biais. Une alternative plus pertinente mais plus complexe à mettre en œuvre, car nécessitant des données plus détaillées, est d'utiliser des données de suivi des individus (VHF, GPS) pendant la dispersion pour construire la carte de résistance (Bennett, 1998). En effet, l'habitat de dispersion des lynx n'est pas forcément le même que l'habitat d'installation (Zimmermann, 2004 : Zimmermann *et al.*, 2007). Ces données permettraient donc d'analyser l'effet des éléments du paysage sur la dispersion et d'en déduire des valeurs de résistance (préférences/évitements) plus objectives et réalistes pour améliorer cette étude. De plus, les variables paysagères utilisées pourraient être complétées par d'autres variables comme la densité humaine (Gehr *et al.*, 2017) ou la densité de proies (chevreuils, chamois ; Filla *et al.*, 2017 ; Belloti *et al.*, 2013) étant donné qu'elles pourraient influencer la dispersion des lynx de la même manière qu'elles influencent leur installation et leur déplacement au sein de leurs domaines vitaux (e.g. Basille *et al.*, 2009). De même, la prise en compte de données localisant les passages à faune (aménagements pour favoriser la connectivité), permettrait d'ajuster les valeurs de résistance. Ces données restent cependant difficiles à acquérir.

La définition des patchs

Les patchs d'habitat favorable définis dans le cadre de cette étude ont été limités à une superficie minimum de 100 km², comme suggéré par Blanc *et al.*, (2015), afin de coïncider avec la taille minimale du domaine vital d'une femelle Lynx installée. Cette règle de décision a abouti à un patch d'habitat favorable dans le Massif du Jura n'incluant pas la moitié nord du massif (trop fragmentée) alors que le Lynx y est bien installé. L'absence de patchs d'habitat favorable dans ce secteur est à

l'origine d'une grande distance séparant les patchs des massifs des Vosges et du Jura. Une surface minimale plus petite, comme par exemple de 50 km² (Zimmermann et Breitenmoser 2007), permettrait d'avoir un patch plus important pour le Massif du Jura, et donc une distance réduite avec le Massif des Vosges. Ceci améliorerait certainement les valeurs de connectivité, notamment pour la méthode de la théorie des circuits et le modèle IBM.

IV.IV Enjeux pour l'amélioration de la connectivité pour le Lynx

Bien que les analyses de connectivité pour le Lynx en France nécessitent d'être approfondies et confrontées à la réalité du terrain, quelques réflexions peuvent d'ores et déjà être conduites sur la nature des mesures de gestion à envisager à l'avenir pour améliorer les échanges d'individus entre noyaux de population Vosges-Jura-Alpes. Tout d'abord, la présence de grandes surfaces forestières continues est indispensable pour le maintien de lynx sur un territoire et la dispersion des jeunes individus (Kramer-Schadt *et al.*, 2004 ; Zimmermann *et al.*, 2005). La fragmentation des forêts par de vastes surfaces agricoles et/ou artificialisées (altération de la perméabilité aux déplacements) ainsi que les infrastructures linéaires de transport (risque de mortalité par collision) constituent en effet un frein important à la dispersion (Klar *et al.*, 2006; Kramer Schadt *et al.*, 2004; Zimmermann *et al.*, 2005). Le Lynx en dispersion peut localement aussi être sensible aux configurations du paysage, telles que la présence de végétation le long des rivières (ripisylve), qui peuvent servir de corridor naturel (Zimmermann, 2004; Zimmermann *et al.*, 2007). Ainsi, les gestionnaires devraient se concentrer sur la préservation ou la restauration des continuités forestières grâce à la mise en place de mesures de gestion conservatoire des habitats de dispersion du lynx (qui mériteraient néanmoins d'être précisées en France). La prise en compte du Lynx dans les Schémas Régionaux de Cohérence Écologique (SRCE) de Lorraine, d'Alsace, Franche-Comté et de Rhône-Alpes (politiques publiques d'aménagement du territoire) ainsi que des enjeux de rétablissement des connectivités devraient contribuer à lutter contre la fragmentation des forêts (Morand 2006). De plus, une réflexion devrait être conduite quant à l'intégration de nouveaux corridors ou flux de dispersion dans les SRCE en fonction de l'avancement des recherches sur la connectivité pour le Lynx. En complément, des actions devraient être conduites pour réduire la mortalité par collision comme la mise en place d'ouvrages de franchissement (passages à faune) en particulier sur les trois axes les plus dangereux et accidentogènes identifiés pour les lynx sur la zone d'étude (Massif du Jura) : la N57 (25), la N5 (39) et la D470 (39 ; Gaillard *et al.*, 2012 ; Annexe 4). L'amélioration de la signalétique sur ces zones à enjeux pourrait aussi être envisagée (Morand 2006).

V - CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cette étude a eu pour objectif de tester trois méthodes de modélisation pour évaluer la connectivité potentielle pour le Lynx en France : la méthode du chemin de moindre coût (LCP), la théorie des circuits et le modèle individu-centré spatialement explicite (IBM). Les résultats obtenus mettent en évidence des points de convergences et de divergences des trois méthodes. Cela souligne l'importance de confronter différentes méthodes d'analyse pour évaluer la connectivité. En effet, l'usage d'une méthode unique pourrait aboutir à des conclusions hâtives quant à l'existence de corridors et donc à des mesures de gestion conservatoire inadaptées. Actuellement, l'existence d'une connectivité potentielle entre le sud du Massif de Jura et le nord du Massif des Alpes a été mise en évidence avec les trois méthodes. En revanche, la connectivité potentielle entre le Massif du Jura et le Massif des Vosges n'a pas conduit à un consensus. Ces résultats préliminaires nécessitent des investigations supplémentaires afin de mieux évaluer, améliorer et préserver la connectivité pour le Lynx en France. L'augmentation de la taille de la zone d'étude, la création d'un modèle d'habitat du Lynx en France, la redéfinition des patchs d'habitat favorable et l'usage de données de suivi de lynx en dispersion sont autant d'éléments qu'il serait intéressant d'explorer pour affiner les résultats. Puis, une fois la connectivité potentielle évaluée et les corridors ou flux de dispersion identifiés, il serait nécessaire de s'assurer de leur fonctionnalité grâce notamment à des investigations de terrain (suivi du Lynx, description fine des corridors, etc.) ou à des outils de validation des modèles *via* l'utilisation de données sur la structure génétique de l'espèce. L'ensemble de ces investigations permettront ainsi d'obtenir une connaissance fine des enjeux de connectivité pour la conservation du Lynx en France afin d'améliorer les mesures de conservation à mettre en place.

VI - BIBLIOGRAPHIE

- Adriaensen, F., Chardon, J.P., de Blust, G., Swinnen, E., Villalba, S., Guljnck, H. & Matthysen, E. (2003). The application of 'least-cost' modelling as a functional landscape model. *Landscape and Urban Planning*, 64, 233–247.
- Adriaensen, F., Githiru, M., Mwang’ombe, J., Matthysen, E. & Lens, L. (2007). Restoration and Increase of Connectivity among Fragmented Forest Patches in the Taita Hills, Southeast Kenya. *Part II technical report*, CEPF project 1095347968, University of Gent, Gent, Belgium.
- Assmann, C. (2011). *Étude de la connectivité des massifs des Vosges et du Jura au niveau de la trame forestière*. Mémoire de stage « Master FAGE ». Nancy-Université, Conseil régional de Lorraine, 30p + Annexes.
- Avon, C. & Bergès, L. (2016). Prioritization of habitat patches for landscape connectivity conservation differs between least-cost and resistance distances. *Landscape Ecology*, 31, 1551–1565.
- Barbosa, A.M., Real, R. & Vargas, J.M. (2009). Transferability of environmental favourability models in geographic space: the case of the Iberian desman (*Galemys pyrenaicus*) in Portugal and Spain. *Ecological Modelling*, 220, 747–754.
- Barton, K.A., Hovestadt, T., Phillips, B.L. & Travis, J.M.J. (2012). Risky movement increases the rate of range expansion. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 279, 1194–1202.
- Basille, M., Herfindal, I., Santin-Janin, H., Linnell, J., Odden, J., Andersen, R., Arild Høgda, K. & Gaillard, J.M. (2009). What shapes Eurasian lynx distribution in human dominated landscapes: Selecting prey or avoiding people? *Ecography*, 32, 683–691.
- Bates, W. & Jones, A. (2007). *Least-cost corridor analysis for evaluation of lynx habitat connectivity in the Middle Rockies*. The Nature Conservancy, Salt Lake City.
- Bauduin, S. (2016). *Integrating functional connectivity and climate change in the design of protected area networks*. Thèse de doctorat. Laval University.
- Beier, P., Majka, D.R. & Newell, S.L. (2009). Uncertainty analysis of least-cost modeling for designing wildlife linkages. *Ecological Applications*, 19, 2067–2077.
- Beier, P., Majka, D.R. & Spencer, W.D. (2008). Forks in the road: choices in procedures for designing wildland linkages. *Conservation Biology*, 22, 836–851.
- Belotti, E., Červený, J., Šustr, P., Kreisinger, J., Gaibani, G. & Bufka, L. (2013). Foraging sites of Eurasian lynx *Lynx lynx*: relative importance of microhabitat and prey occurrence. *Wildlife Biology*, 19, 188–201.
- Bennett, A.F. (1998). *Linkages in the Landscape: the Role of Corridors and Connectivity in Wildlife Conservation* (IUCN, Gland, Switzerland, and Cambridge).
- Blanc, L., Kramer-Schadt, S., Bernard, C., Zimmermann, F., Marboutin, E. & Gimenez, O. (2015). Restoring a viable population of lynx in the French Vosges Mountains : Insights from a spatially explicit individual-based model. In : *Dynamique des populations d’espèces rares et élusives : Le Lynx Boréal en Europe*. Blanc L. 2015, Thèse en Biologie des populations et Ecologie, Université de Montpellier 2, UMR CNRS 5175 (Laboratoire d’Ecologie Fonctionnelle et Evolutive), 140-168.
- Bond, M.L., Bradley, C.M., Kiffner, C., Morrison, T.A. & Lee, D.E. (2017). A multi-method approach to delineate and validate migratory corridors. *Landscape Ecology*, 32, 1705–1721.
- Breitenmoser, U. (1997). Significance of food resources in re-introduction projects of large carnivores: the case of the lynx. - Supplementi Ricerca Biologica Selvaggina XXVII: 269-275.
- Breitenmoser, U., Kaczensky, P., Dötterer, M., Breitenmoser-Würsten, C., Capt, S., Bernhart, F. & Liberek, M. (1993). Spatial organization and recruitment of Lynx (*Lynx Lynx*) in a re-introduced population in the Swiss Jura Mountains. *Journal of Zoology*, 231, 449-464.
- Brown, J. H. & Kodric-Brown, A. (1977). Turnover rates in insular biogeography—effect of immigration on extinction. *Ecology*, 58, 445–449.
- Calabrese, J.M. & Fagan, F.F. (2004). A comparison-shopper’s guide to connectivity metrics. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2, 529-536.
- Carroll, C., McRae, B.H. & Brookes, A. (2011). Use of linkage mapping and centrality analysis across habitat gradients to conserve connectivity of Gray Wolf populations in Western North America. *Conservation Biology*, 26(1), 78–87.
- Chetkiewicz, C-L.B. & Boyce, M.S. (2009). Use of resource selection functions to identify conservation corridors. *Journal of Applied Ecology*, 46, 1036–1047.
- Coulon, A., Aben, J., Palmer, S., Stevens, V., Callens, T., Strubbe, D., Lens, L., Matthysen, E., Baguette, M. & Travis, J.M. (2015). A stochastic movement simulator improves estimates of landscape connectivity. *Ecology*, 96, 2203–2213.
- CROC (2014). Bilan des programmes scientifiques et des activités pédagogiques conduits par le CROC du 1er janvier au 31 décembre 2013. Rédaction : Germain E. et Pichenot P., Mai 2014, 114p.

- CROC (2015). Bilan des programmes scientifiques et des activités pédagogiques conduits par le CROC du 1er janvier au 31 décembre 2014. Rédaction : Germain E., Pichenot P., Papin M. et Clasquin M., Mai 2015, 152p.
- CROC (2016). Bilan des programmes scientifiques et des activités pédagogiques conduits par le CROC du 1er janvier au 31 décembre 2015. Rédaction : Germain E., Papin M. et Charbonnel A., Mai 2016, 122p.
- CROC (2017). Bilan des programmes scientifiques et des actions pédagogiques conduits par le CROC du 1er janvier au 31 décembre 2016. Rédaction : Germain E., Charbonnel A. et Papin M., Mai 2017, 68p.
- Crooks, K.R. (2002). Relative Sensitivities of Mammalian Carnivores to Habitat Fragmentation. *Department of Biology, University of California*, Santa Cruz, CA 95064, U.S.A. 123 p.
- Crooks, K.R. & Sanjayan, M.A. (2006). Connectivity Conservation. *Cambridge: Cambridge Univ. Press*. 736 p.
- Cushman, S.A. (2006). Effects of habitat loss and fragmentation on amphibians: a review and prospectus. *Biological Conservation*, 128, 321–240.
- Cushman, S.A., McKelvey, K.S. & Schwartz, M.K. (2009). Use of empirically derived source-destination models to map regional conservation corridors. *Conservation Biology*, 23, 368–376.
- Cushman, S.A., Mcrae, B., Adriaensen, F., Beier, P., Shirley, M., & Zeller, K. (2013). Biological corridors and connectivity. *Conservation Biology*, 384–404.
- Driezen, K., Adriaensen, F., Rondinini, C., Doncaster, C.P. & Matthysen, E. (2007). Evaluating least-cost model predictions with empirical dispersal data: a case-study using radiotracking data of hedgehogs (*Erinaceus europaeus*). *Ecological Modelling*, 209, 314–322.
- Fagan, W.F. & J.M. Calabrese. (2006). Quantifying connectivity: balancing metric performance with data requirements. *Connectivity Conservation* (eds K.R. Crooks & M.A. Sanjayan), 297–317.
- Fahrig, L. (2003). Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics*, 34, 487–515.
- Fahrig, L., Pedlar, J., Pope, S., Taylor, P., Wegner J. (1995). Effects of road traffic on amphibian density. *Biological Conservation*, 74, 177–182.
- Filla, M., Premier, J., Magg, N., Dupke, C., Khorozyan, I., Waltert, M., Bufka, L. & Heurich, M. (2017). Habitat selection by Eurasian lynx (*Lynx lynx*) is primarily driven by avoidance of human activity during day and prey availability during night. *Ecological Evolution*, 7, 6367–6381.
- Gaillard, J.M., Hemery, A., Bonnenfant, C., Marboutin, E., Mauz, I. & Doré, A. (2012). *Mise au point d'un modèle de diagnostic des interactions entre structures paysagères, infrastructures de transports terrestres et espèces emblématiques. Le cas du Lynx dans le massif jurassien*. Rapport final programme ITTECOP. 82p
- Gantchoff M.G. & Belant, J.L. (2017). Regional connectivity for recolonizing American black bears (*Ursus americanus*) in southcentral USA. *Biological Conservation*, 214, 66–75.
- Gehr, B., Hofer, E.J., Muff, S., Ryser, A., Vimercati, E., Vogt, K. & Keller, L.F. (2017). A landscape of coexistence for a large predator in a human dominated landscape. *Oikos*, 126, 1389–1399.
- Gibbs, J.P. (1998). Amphibian movements in response to forest edges, roads, and streambeds in southern New England. *Journal of Wildlife Management*, 62, 584–589.
- Graves, T.A., Farley, S., Goldstein, M.I. & Servheen, C. (2007). Identification of functional corridors with movement characteristics of brown bears on the Kenai Peninsula, Alaska. *Landscape Ecology*, 22, 765–772.
- Harrison, R.L. (1992). Toward a theory of inter-refuge corridor design. *Conservation Biology*, 6, 293–295.
- Hemery, A. & Doré, A. (2011). Vers une prise en compte de la problématique des collisions par les infrastructures terrestres chez le lynx? La réflexion avance. *Bulletin lynx du réseau*, 17, 7–9.
- Hetherington, D.A., Lord, T.C. & Jacobi, R.M. (2006). New evidence for the occurrence of Eurasian lynx (*Lynx lynx*) in medieval Britain. *Journal of Quaternary Science*, 21, 3–8.
- Hilty, J. A. & Merenlender, A. M. (2004). Use of riparian corridors and vineyards by mammalian predators in Northern California. *Conservation Biology*, 18, 126–135.
- Howard, W. E. (1960). Innate and environmental dispersal of individual vertebrates. *American Midland Naturalist*, 63, 152–161.
- Huck, M., Jedrzejewski, W., Borowik, T., Miosz-Cielma, M., Schmidt, K., Jedrzejewska, B., Nowak, S. & Mysajek, R. (2010). Habitat suitability, corridors and dispersal barriers for large carnivores in Poland. *Acta Theriologica*, 55, 177–195.
- Hurstel A. & Laurent A. (2016). Première preuve de dispersion du Lynx d'Eurasie (*Lynx lynx*) du Jura vers les Vosges. *Ciconia*, 40, 1–6.
- Klar, N., Herrmann, M. & Kramer-Schadt, S. (2006). Effects of roads on a founder population of lynx in the biosphere reserve “Pfalzerwald -Vosges du Nord” A model as planning tool. *Naturschutz und Landschaftsplanung*, 38, 330–337.

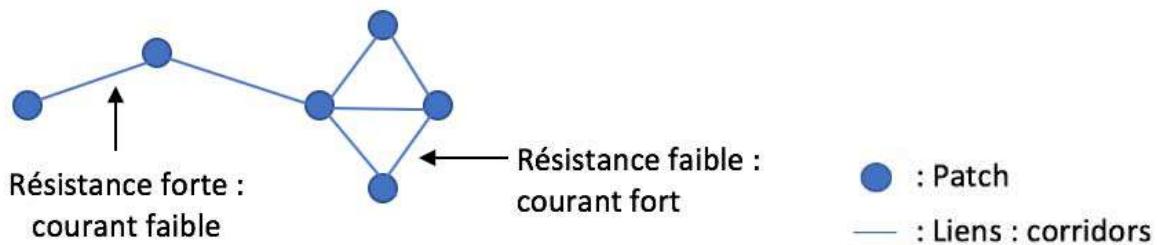
- Kool, J., Moilanen, A. & Treml, E. (2013). Population connectivity: recent advances and new perspectives. *Landscape Ecology*, 28, 165–185.
- Kramer-Schadt, S., Kaiser, T.S., Frank, K. & Wiegand, T. (2011). Analyzing the effect of stepping stones on target patch colonisation in structured landscapes for Eurasian lynx. *Landscape Ecology*, 26, 501–513.
- Kramer Schadt, S., Revilla, E. & Wiegand, T. (2005). Lynx reintroductions in fragmented landscapes of Germany: Projects with a future or misunderstood wildlife conservation? *Biological Conservation*, 125, 169–182.
- Kramer-Schadt, S., Revilla, E., Wiegand, T., & Breitenmoser, U. (2004). Fragmented landscapes, road mortality and patch connectivity: modelling influences on the dispersal of Eurasian lynx. *Journal of Applied Ecology*, 41, 711–723.
- Larkin, J. L., Maehr, D. S., Hoctor, T. S., Orlando, M. A. & Whitney, K. (2004). Landscape linkages and conservation planning for the black bear in west-central Florida. *Animal Conservation*, 7, 23–34.
- LaRue, M.A.(2005). *Predicting potential Habitat and dispersal corridors for cougars in midwestern north america*. Thèse de doctorat, Southern Illinois University Carbondale.
- LaRue, M.A. & Nielsen, C.K. (2008). Modeling potential dispersal corridors for cougars in midwestern North America using least-cost path methods. *Ecological Modelling*, 212, 372–381.
- Laurent, A., Léger, F., Briaudet, P.-E., Léonard, Y., Bataille, A. & Goujon, G. (2012). Évolution récente (2008-2010) de la population de lynx en France. *Faune sauvage*, 294, 38-39.
- L'équipe animatrice du Réseau (2014). Bilan national d'évolution de l'aire de présence détectée du Lynx. Les données du Réseau. *Bulletin Lynx du Réseau*, 26–27.
- L'équipe animatrice du Réseau (2016). Bilan national d'évolution de l'aire de présence détectée du Lynx en 2014-2015. *Bulletin Lynx du Réseau*, 26–27.
- Louvrier, J., Molinari-Jobin, I., Kéry, M., Chambert, T., Miller, D., Zimmermann, F., Marboutin, E., Molinari, P., Müller, O., Cerne, R. & Gimenez, O. (2018). Use of ambiguous detections to improve estimates from species distribution models. *Conservation Biology*, in press.
- Magg, N., Müller, J., Heibl, C., Hackländer, K., Wölfl, S., Wölfl, M., Bufka, L., Červený, J. & Heurich, M. (2016). Habitat availability is not limiting the distribution of the Bohemian–Bavarian lynx (*Lynx lynx*) population. *Oryx*, 50, 742–752.
- Marboutin, E., Duchamp, C., Moris, P., Briaudet, P.E., Léger, F., Laurent, A., Léonard, Y. & Catusse, M. (2011). Le suivi du statut de conservation de la population de lynx en France : bilan pour la période triennale 2008-2010. *Bulletin lynx du réseau*, 17, 24-30.
- Marboutin, E. (2013). Note sur le statut du Lynx dans les Vosges. *Bulletin Lynx du Réseau*, 14–17.
- McRae, B.H. (2006). Isolation by resistance. *Evolution*, 60, 1551–1561.
- McRae, B.H., Dickson, B.G., Keitt, T.H. & Shah, V.B. (2008). Using circuit theory to model connectivity in ecology and conservation. *Ecology*, 10, 2712–2724.
- Meegan, R.P. & Maehr, D.S. (2002). Landscape conservation and regional planning for the Florida panther. *Southeastern Naturalist*, 1, 217–32.
- Moilanen, A. & Hanski, H. (2001). On the use of connectivity measures in spatial ecology. *Oikos*, 95, 147- 151.
- Moilanen, A. & Nieminen, M. (2002). Simple connectivity measures in spatial ecology. *Ecology*, 83, 1131–1145.
- Morand, A. (2016). *Le Lynx : risques routiers et mesures correctrices – état des lieux et recommandations*. Cerema. 75p + Annexes.
- Noss, R. F., Quigley, H. B., Hornocker, M. G., Merrill, T. & Paquet, P.C. (1996). Conservation biology and carnivore conservation in the Rocky Mountains. *Conservation Biology*, 10, 949–963.
- ONCFS (2017). Répartition du Lynx en France depuis 1987. Portail Carmen [http://carmen.carmencarto.fr/38/Lynx_presence_par_maille.map], consulté le 24/04/2018.
- Palmer, S.C.F., Coulon, A. & Travis, J.M.J. (2011). Introducing a ‘stochastic movement simulator’ for estimating habitat connectivity. *Methods in Ecology and Evolution*, 2, 258–268.
- Pinto N, Keitt T, Wainright M (2012). LORACS: JAVA software for modeling landscape connectivity and matrix permeability. *Ecoigraphy*, 35(5), 388-392.
- Proctor, M.F., Nielsen, S.E., Kasworm, W.F., Servheen, C., Radandt, T.G., Machutchon, A.G. & Boyce, M.S. (2015). Grizzly bear connectivity mapping in the Canada-United States trans-border region. *Journal of Wildlife Management*, 79, 544–558.
- Rabinowitz, A. & Zeller, K.A. (2010). Arange-wide model of landscape connectivity and conservation for the jaguar, *Panthera onca*. *Biological Conservation*, 143, 939–945.
- Rathore, C.S., Dubey, Y., Shrivastava, A., Pathak, P. & Patil, V. (2012). Opportunities of habitat connectivity for tiger (*Panthera tigris*) between Kanha and Pench national parks in Madhya Pradesh, India. *PloS ONE*. 7:e39996.
- Raydelet, P. (2006). *Le Lynx boreal*, Editions Delachaux et Niestlé, Lausanne et Paris. 191p.

- Reh, W. & Seitz, A. (1990). The influence of Land Useon the genetic structure of populations of the common frog (*Rana temporaria*). *Biological Conservation*, 54, 239–249
- Revilla, E., Wiegand, T., Palomares, F., Ferreras, P. & Delibes, M. (2004). Effects of matrix heterogeneity on animal dispersal: from individual behavior to metapopulation-level parameters. *American Naturalist*, 164, E130–E153.
- Schadt, S., Knauer, F., Kaczensky, P., Revilla, E., Wiegand, T. & Trepl, L. (2002). Rule-based assessment of suitable habitat and patch connectivity for Eurasian Lynx in Germany. *Ecological Application*, 12, 1469–1483.
- Schwoerer, M.-L. & Scheid, C. (2016). Le projet « Life Lynx » de réintroduction du félin sur le palatinat Allemand entre dans sa phase opérationnelle. *Bulletin Lynx du Réseau*, 20, 2.
- Singleton, P.H., Gaines, W.L. & Lehmkuhl, J.F. (2002). Landscape permeability for large carnivores in Washington: a geographic information system weighted-distance and least-cost corridor assessment. *United States Department of Agriculture Forest Service Pacific Northwest Research Station Research Paper*, 549, 1–89.
- Stahl, P. & Vandel, J.M. (1998). *Le lynx boreal. Encyclopédie des carnivores de France. Société française pour l'étude et la protection des mammifères* (SFEPM).
- Squires, J.R., DeCesare, N.J., Olson, L.E., et al. (2013). Combining resource selection and movement behavior to predict corridors for Canada lynx at their southern range periphery. *Biological Conservation*, 157, 187–195.
- Taylor, P.D., Fahrig, L., Henein, K. & Merriam, G. (1993). Connectivity is a vital element in landscape structure. *Oikos*, 68, 571–73.
- Tischendorf, L. & Fahrig, L. (2000). How should we measure landscape connectivity? *Landscape Ecology*, 15, 633–641.
- Tracey, J.A. (2006). Individual-based modeling as a tool for conserving connectivity. *Connectivity Conservation* (eds K.R. Crooks & M. Sanjayan), 343–368.
- Urban, D. & Keitt, T. (2001). Landscape connectivity: a graph-theoretic perspective. *Ecology*, 82, 1205–1218.
- Vandel, J. M., & Stahl, P. (2005). Distribution trend of the Eurasian lynx *Lynx lynx* populations in France. *Mammalia*, 69, 145–158.
- Walker, R. & Craighead, L. (1997). *The Biology and Conservation of Wild Felis*. Proceedings of the ESRI European User Conference on Analyzing Wildlife Movement Corridors in Montana Using GIS, Copenhagen, 1997, 1–18.
- Walpole, A.A., Bowman, J., Murray, D.L & Wilson, P.J. (2012). Functional connectivity of lynx at their southern range periphery in Ontario Canada. *Landscape Ecology*, 27, 761–773.
- Weaver, J.L., Paquet, P.C. & Ruggiero, L.F. (1996). Resilience and conservation of large carnivores in the Rocky Mountains. *Conservation Biology*, 10, 964–976.
- Wilcove D.S., Mclellan C.H. & Dobson A.P., (1986). Habitat fragmentation in the temperate zone, *Conservation biology. The science of scarcity and diversity*, Sinaueras publ., Sunderland, 237–256.
- Wilson, P. J. & J. Provan. (2003). Effect of habitat fragmentation on levels and patterns of genetic diversity in natural populations of peat moss *Polytrichum commune*. *Proceedings of the Royal Society of London Series*, 270, 881–886.
- Woodroffe, R., & J. R. Ginsberg. (1998). Edge effects and the extinction of populations inside protected areas. *Science*, 280, 2126–2128.
- Zimmermann, F. (2004). *Conservation of the Eurasian lynx (Lynx lynx) in a fragmented landscape – habitat models, dispersal, and potential distribution*. University of Lausanne.
- Zimmermann, F., & Breitenmoser, U. (2007). Potential distribution and population size of the Eurasian lynx *Lynx lynx* in the Jura Mountains and possible corridors to adjacent ranges. *Wildlife Biology*, 13, 406–416.
- Zimmermann, F., Breitenmoser Wursten, C. & Breitenmoser, U. (2005). Natal dispersal of Eurasian lynx (*Lynx lynx*) in Switzerland. *Journal of Zoology*, 267, 381–395.
- Zimmermann, F., Breitenmoser-Wursten, C. & Breitenmoser, U. (2007). Importance of dispersal for the expansion of a Eurasian lynx *Lynx lynx* population in a fragmented landscape. *Oryx*, 41, 358–368.
- Zollner, P.A. & Lima, S.L. (1999). Search strategies for landscape-level interpatch movements. *Ecology*, 80, 1019–1030.

VII - ANNEXES

Annexe 1 : Valeurs de résistance attribuées par dires d'experts aux différentes variables paysagères (hormis HABITAT). Pour les routes à deux chaussées et les routes à une chaussée, l'intensité du trafic a été réparties en trois classes : la classe A correspond à un fort trafic, la classe B correspond à un trafic d'intensité moyenne tandis que la classe C correspond à un faible trafic.

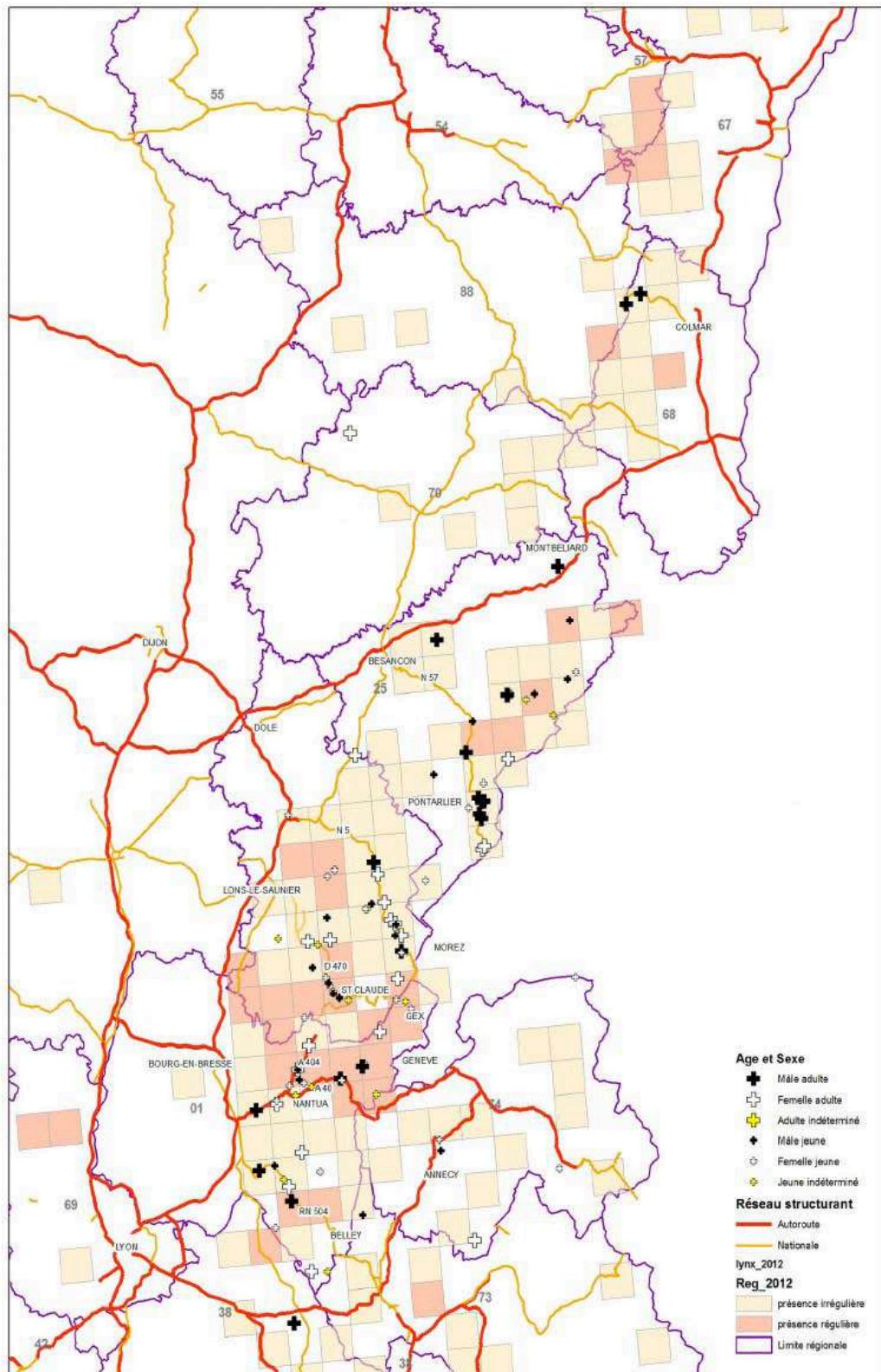
Variables paysagères	Description des variables / catégories	Valeurs de résistance sur dires d'experts
BATI	Constructions anthropiques dont la surface > à 20 m ²	8
HYDRO_SURFACE	Surfaces en eau (lacs, étangs, etc.)	5
HYDRO_LINEAIRE	Canaux dont la largeur > à 50 m	9
	Cours d'eau naturels dont la largeur > 50 m	8
	Canaux de 15 à 50 m de large	7
	Cours d'eau naturels de 15 à 50 m de large	4
	Canaux de 0 à 15 m de large	4
	Cours d'eau naturel de 0 à 15 m de large	1
ROUTE	Autoroutes	9
	Routes à 2 chaussées classe A	8
	Routes à 2 chaussées classe B	7
	Routes à 2 chaussées classe C	5
	Routes à 1 chaussée classe A	4
	Routes à 1 chaussée classe B	3
	Routes à 1 chaussée classe C	2
voie_FERREE	LGV (Ligne à Grande Vitesse)	6
	Voies ferrées principales et de service	1



Annexe 2 : Schéma synthétique du fonctionnement de CircuitScape. Les ronds bleus représentent les patchs d'habitat favorable et les traits représentent les liens, donc les corridors ou flux de dispersion, existant entre deux patchs. Lorsque la résistance entre deux patchs est forte, peu de courant circule entre les deux patchs. A l'inverse, lorsque la résistance est faible, l'intensité du courant circulant entre deux patchs d'habitat favorable est élevée.

Annexe 3 : Synthèse comparative des avantages et inconvénients des trois méthodes d'analyse utilisées dans le cadre de cette étude : la méthode LCP, la théorie des circuits et le modèle IBM.

Méthode	Avantages	Inconvénients	Publications	Espèce
Least Cost Path (LCP)	<ul style="list-style-type: none"> - Prise en compte de la distance Euclidienne - Algorithme simple avec des procédures de calcul performantes pour effectuer des analyses sur des paysages très complexes et étendus - Adaptatif : nécessite peu de données environnementales - Rapide 	<ul style="list-style-type: none"> - Identifie seulement un seul chemin optimal et ignore les chemins alternatifs potentiels - Pas de prise en compte de marche aléatoire - Implique que l'espèce ait conscience du cheminement optimal - Limitées à la prédiction de la connectivité entre des sources uniques et des destinations uniques - Pas de prise en compte des choix individuels - Pas de prise en compte des mouvements dans une direction 	<p>Schadt <i>et al.</i>, 2002a Bates <i>et al.</i>, 2007 Squires <i>et al.</i>, 2013 Zimmermann <i>et al.</i>, 2007 Thèse L.Blanc 2013 Rabinowitz <i>et al.</i>, 2010 La Rue 2005 Huck <i>et al.</i>, 2010 Planckaert 2009 LaRue 2008 Chetkiewicz <i>et al.</i>, 2009 Meegan et Maehr, 2002 Rathore <i>et al.</i>, 2012 Larkin <i>et al.</i>, 2004 Cushman 2009</p>	<i>Lynx lynx</i> <i>Lynx canadensis</i> <i>Lynx canadensis</i> <i>Lynx lynx</i> <i>Lynx lynx</i> <i>Panthera onca</i> <i>Puma concolor</i> <i>Canis lupus</i> <i>Martes martes</i> <i>Puma concolor</i> <i>Ursus arctos horribilis</i> <i>Puma concolor coryi</i> <i>Panthera tigris</i> <i>Ursus americanus</i> <i>Ursus americanus</i>
Théorie des Circuits	<ul style="list-style-type: none"> - Basée sur la théorie de la marche aléatoire - Identifie les chemins alternatifs potentiels - Applicable à grande échelle - Intuitif, outil très puissant 	<ul style="list-style-type: none"> - Pas de prise en compte des mouvements dans une direction - Pas de prise en compte des choix individuels - Limités à des marches aléatoires markoviennes (chaque pas est indépendant des pas précédents). - Pas de « mémoire » du chemin emprunté - Pas de prise en compte des changements de mouvement avec le temps ou des taux de mortalité variant avec l'âge d'un organisme 	<p>Walpole <i>et al.</i>, 2012 Gantchoffà <i>et al.</i>, 2017 Proctor <i>et al.</i>, 2015</p>	<i>Lynx canadensis</i> <i>Ursus americanus</i> <i>Ursus arctos horribilis</i>
IBM	<ul style="list-style-type: none"> - Prise en compte des mouvements dans une direction - Prise en compte des choix individuels dans l'espace et dans le temps 	<ul style="list-style-type: none"> - Demande une grande quantité de paramètres et une excellente connaissance sur la biologie de l'espèce 	<p>Coulon <i>et al.</i>, 2015 Thèse Bauduin 2016 Palmer <i>et al.</i>, 2010 Kramer-Schadt <i>et al.</i>, 2018</p>	<i>Epidalea calamita</i> ; <i>Phyllastrephus cabanisi</i> <i>Rangifer tarandus</i> <i>Lynx lynx</i>



Annexe 4 : Localisation des trois axes les plus accidentogènes (N57, N5, D470) pour les lynx dans l'étude de Gaillard *et al.*, (2012) auxquels s'ajoutent trois autres axes routiers accidentogènes plus au sud (A 404 et A 40 ; N504). La carte des zones de présence de lynx (2012) est affichée en transparence (source : Morand, 2016)

ANNEXE 4 : Souillot D. 2019. Réduire et éviter le risque de mortalité du Lynx boréal (*Lynx lynx*) par collision avec les véhicules de transports terrestres dans le Massif du Jura - Typologie des tronçons accidentogènes et profils biologiques des lynx morts. Stage de Master 2 au Cerema DTer Est. Université de Perpignan Via Domitia, Master Biodiversité, Ecologie, Evolution, Parcours "Biodiversité et Développement Durable. 48p.

Université de Perpignan Via Domitia
Master Biodiversité, Ecologie, Evolution
Parcours "Biodiversité et Développement Durable"



Réduire et éviter le risque de mortalité du Lynx boréal (*Lynx lynx*) par collision avec les véhicules de transports terrestres dans le Massif du Jura

~
Typologie des tronçons accidentogènes et profils biologiques des lynx morts

Présenté par Delphine SOUILLOT



Année universitaire 2018-2019

Sous la direction d'Alain Morand

Au Centre d'Etudes et d'expertises sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement



Ce rapport a été réalisé lors du Master "Biodiversité et Développement durable" au cours de l'année 2019 et s'est déroulé dans le cadre du programme "ERC Lynx" (site <https://sites.google.com/view/erclynx/>) au sein de la Division « Biodiversité, Eau et Aménagement » (Cerema Est) et en collaboration avec les autres partenaires de l'équipe projet (CEFE-CNRS, CROC, ONCFS). Dans ce mémoire de stage, la méthode (choix et transformation des variables, notamment) comme les résultats statistiques et cartographiques, relève pour la plupart d'une approche seulement descriptive, et ne permettent pas de présager d'éventuels relations de causes à effet. Ce travail n'a par ailleurs pas fait l'objet d'une validation par les pairs, pour des raisons de contraintes de temps et une réponse aux attentes précises de l'équipe enseignante universitaire. Il constitue en l'état une approche originale et suggère quelques pistes de réflexion à approfondir lors de futures études et travaux de recherche pour mesurer et prévenir l'impact des infrastructures sur la conservation du Lynx.

Equipe projet ERC-Lynx.

Table des matières

Table des sigles et acronymes et leur signification :	ii
Remerciements :	iii
Contexte du stage :	iv
Introduction	1
I Matériels et Méthodes	3
I.I Espèce étudiée : le Lynx boréal	3
I.II Zone d'étude	4
I.III Collecte et structuration des données	6
I.IV Les données et variables utilisées	7
I.V Analyses statistiques	10
I.V.1 Analyses univariées et bivariées	10
I.V.2 Statistiques multivariées : Analyse des Correspondances Multiples (ACM)	10
I.VI Analyse spatiale par Système Informatique Géographique (SIG)	10
II Résultats	11
II.I Récolte de données	11
II.II Analyses univariés	12
II.III Analyses bivariés	13
II.IV Statistiques multivariés par analyse des correspondances multiples (ACM)	14
II.V Analyse spatiale par Système Informatique Géographique (SIG)	17
V Discussion	20
Conclusion	26
Référence bibliographique	28
Annexes	1

Table des sigles et acronymes et leur signification :

A : Autoroute

ACM : Analyse de Correspondances Multiples

APRR : Autoroute Paris-Rhin-Rhône

Asso : Associations de protection de la nature

AuRA : Auvergne-Rhône-Alpes

BCF : Bourgogne-Franche-Comté

CD : Conseil Départemental

CEFE : Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive

CEREMA : Centre d'Études et d'expertises sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement

CIA : Central Intelligence Agency

CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique

CROC : Centre de Recherche et d'Observation sur les Carnivores

DIR : Direction Interdépartementale des Routes

EFR : European Union Road Federation

ERC : Eviter, Réduire, Compenser

FDC : Fédération Départementale des Chasseurs

GBA : Glissière en Béton Adhérent

ILT : Infrastructure Linéaire de Transport

ITT : Infrastructures de Transports Terrestres

ITTECOP : Infrastructures de transports Terrestres, ECosystèmes et Paysages

MCTRC : Ministère de la Cohésion des Territoires et des Relations avec les Collectivités Territoriales

MNHN : Muséum Nationale d'Histoire Naturelle

MTES : Ministère de la Transition Écologique et Solidaire

ONCFS : Office National de la Chasse et de la Faune Sauvage

PF : Passage à Faune

PL : Poids Lourds

PLMV : Programme Lynx Massif des Vosges

PNA : Plan National d'Action

PNCL : Plan National pour la Conservation du Lynx

RD : Route Départementale

RN : Route Nationale

SFEPM : Société Française pour l'Etude et la Protection des Mammifères

SIG : Système d'Information Géographique

SRCE : Schéma Régional de Cohérence Ecologique

TPC : Terre-Plein Central

TV : Tous Véhicules

UICN : Union Internationale pour la Conservation de la Nature

V85 : Vitesse réalisée par 85 % des automobilistes comptés

VL : Véhicule Léger

Remerciements :

Je voudrais remercier tout d'abord l'équipe d'ERC-Lynx (Estelle, Anaïs, Sarah, Olivier, Christophe et Alain) qui m'a accompagné et guidé durant ce projet. De m'avoir permise de travailler sur cette espèce et pour leur bonne humeur et humour durant les réunions. Un merci particulier à Alain Morand mon encadrant, qui m'a épaulé tout au long de ce stage.

Mes remerciements vont également à l'ensemble de la division environnement du Cerema (Luc, Marc, Pierre, François, Julian, Thomas, Sylvain et Cécile plus les stagiaires et vacataires, Julien, Didier et Théotime), ainsi qu'à Gérald qui a bien voulu partager son bureau et le groupe repas/café. Merci de m'avoir accueillie aussi chaleureusement, de m'avoir intégré à votre équipe, permise de partager votre sortie d'équipe et pour tout ce que vous m'avez apporté durant ce stage, et je ne parle pas que des cafés Gérald.

Merci également à tous les acteurs avec qui j'ai eu l'occasion d'échanger, par mail, au téléphone ou bien en face à face. Merci particulièrement aux Conseils départementaux du Jura et du Doubs, qui ont eu la gentillesse de m'accueillir dans leurs locaux. Merci également à tous ceux qui m'ont raconté leur rencontre avec cet animal magnifique que j'espère croiser un jour, je pense à Stéphane Regazzoni et Christian Bulle.

Un merci également à Delphine Chenesseau, Laurent Balestra et Jérôme Bombois pour nous avoir accompagné sur le terrain, raconté les accidents passés sur leur secteur, et montré, expliqué comment se réalise le suivi Lynx.

Je voudrais également remercier les coordinatrices et coordinateurs PNA (Luc et ses collègues), PNCL (Marine), PLMV (Estelle et Anaïs) de m'avoir permise de participer aux réunions techniques et ainsi que de rencontrer une multitude d'acteurs d'horizons différents qui souhaitent aider à la protection/conservation de cette espèce.

Je finirai par remercier ma famille et mes amis pour leur soutien et leur aide, et de m'avoir permise de travailler sur cet animal qui me tient à cœur.

Contexte du stage :

Ce stage a été réalisé au sein du Centre d'Études et d'expertises sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement (Cerema). Cet organisme est un établissement public national sous la direction du Ministère de la Transition Écologique et Solidaire (MTES) ainsi que du Ministère de la Cohésion des Territoires et des Relations avec les Collectivités Territoriales (MCTRC). L'établissement a quatre grandes missions, l'appui aux politiques publiques, l'innovation et la recherche, la diffusion des connaissances ainsi que la normalisation. Elles sont réalisées par plus de 2 800 agents dont 426 experts et chercheurs répartis sur l'ensemble du territoire français (11 sites géographiques). Cette large distribution et ancrage est une force dans la réalisation des missions et objectifs de l'établissement (Cerema, 2019). La prise en compte de la biodiversité dans les projets d'aménagement et d'infrastructures routières est une activité depuis les années 80.

En 2008, un appel à projet est lancé par le programme Infrastructures de Transports Terrestres, ECOsystèmes et Paysages (ITTECOP). En 2017, dans ce cadre, le CEFE-CNRS (le 1^{er} laboratoire d'écologie en France), le Cerema, le CROC (centre de recherche en éco-éthologie et écologie appliquée sur les mammifères carnivores Européens) et l'ONCFS (Office National de la Chasse et de la Faune Sauvage) soumettent le projet ERC-Lynx « Éviter, réduire et compenser la mortalité du Lynx par collision avec les véhicules de transport » à l'appel à projet ITTECOP 2018-2020.

C'est dans le cadre de ce projet de recherche que mon stage a été réalisé. Les missions qui m'ont été confiées avaient deux objectifs : (1) l'acquisition de données fines sur les Infrastructures de Transports Terrestres (ITT) à partir d'échanges avec les acteurs concernés et (2) l'étude des collisions et la proposition de mesures d'évitements et de réductions. Au démarrage du stage, il était prévu de les mener à deux échelles, tout d'abord sur l'ensemble du Massif du Jura puis, plus finement, sur les tronçons les plus accidentogènes. Cependant, durant la phase d'acquisition de données en lien avec les ITT, nous n'avons soit pas pu obtenir toutes les informations que nous souhaitions (absence de bases de données les compilant de manière homogène et exhaustive), soit trop tardivement ce qui ne nous a pas permis de les exploiter à temps. Cela a conduit à la proposition d'une action concrète à savoir la création de base de données sur les Infrastructures Linéaires de Transports (ILT), dans le but de mener à terme des études plus poussées sur la compréhension des collisions. Cette proposition d'action figure actuellement dans le Programme Lynx Massif des Vosges (PLMV), le Plan National pour la Conservation du Lynx (PNCL) et le Plan National d'Action (PNA) en faveur du Lynx boréal.

Introduction

En 2013, la surface de la terre était parcourue par 64 millions de kilomètres de routes (CIA, 2013) dont 5 millions, en 2011, uniquement dans l’Union Européenne (EFR, 2011). Toutes ces routes permettent de se déplacer plus rapidement, sur de plus longues distances. Avec l’augmentation des automobilistes et pour gagner plus de temps, les dimensions des routes sont régulièrement revues à la hausse. Différentes études fondées sur des modèles mathématiques prédisent que d’ici 2050, ce sont 1.7 à 2.8 milliards de véhicules qui seront en circulation soit deux fois plus qu’en 2009 (870 millions ; Wec 2011 ; Meyer et al, 2012). Avec la disparition des milieux naturels et l’ajout de l’artificialisation des paysages, la fragmentation des habitats naturels continue elle aussi d’augmenter entraînant l’isolement de certaines populations et parfois même, leur extinction (Chapron et al, 2014 ; Grilo et al, 2015). Il existerait trois effets majeurs néfastes des routes et du trafic sur la vie sauvage : la fragmentation des populations en sous population plus petite ; la dégradation des habitats ; et l’augmentation de la mortalité par collision (Grilo et al, 2015). Elles ont un impact négatif sur de nombreuses espèces sauvages et notamment sur les grands carnivores (Stahl et Vandel, 1998 ; Crooks, 2002 ; Schmidt-Posthaus et al, 2002). Ces derniers ont en effet de grands territoires sur lesquels ils se déplacent et où le risque de collision avec les Infrastructures Linéaires de Transport (ILT) est bien présent. Par exemple, au sud de l’Espagne, 17 % des Lynx pardelle (*Lynx pardinus*) meurent par collision (Ferreras et al, 2012). Et qu’en est-il pour le Lynx boréal (*Lynx lynx*) en Europe et en France ?

Au niveau Européen, Le Lynx boréal est inscrit à l’Annexe III de la Convention de Berne, ainsi qu’à l’Annexe II de la Directive « Habitats, Faune, Flore » mais n’est pas prioritaire (Convention de Berne ; 92/43 EEC). En France, l’espèce est classée en danger sur la liste rouge nationale de l’UICN (UICN France, MNHN, SFEPM & ONCFS, 2009). Dans les paysages anthropisés d’Europe, les lynx n’échappent pas aux impacts et menaces de l’artificialisation des paysages et au risque accru de collisions mortelles lors de leurs déplacements quotidiens ainsi que pendant la période de dispersion (Chapron et al, 2014). Les accidents par collision sont identifiés comme l’une des premières causes de mortalité chez le Lynx boréal en France, menaçant ces petites populations déjà vulnérables (Morand et al, 2016) mais aussi plus largement en Europe (Kaczensky et al, 2013 ; Chapron et al, 2014).

En Europe, au 20^{ème} siècle, les populations de lynx étaient réduites à la Scandinavie, aux Carpates, à l’Est Baltiques et aux régions Balkans (Breitenmoser et al, 2001 ; Linnell et al, 2009). A la fin de ce siècle, elles s’étendaient naturellement ou grâce aux programmes de réintroductions (Breitenmoser et al, 2000 ; Vandel, 2001 ; Von Arx et al, 2004 ; Kaczensky et al, 2013), et ont fait leur

retour en Europe de l’Ouest et Centrale (Chapron et al, 2014). Aujourd’hui la répartition de l’espèce s’étend sur 23 pays Européens dont la population est fragmentée en noyaux (Chapron et al, 2014). Depuis ces dernières décennies, elle est estimée à 9 000 individus et malgré sa stabilité, elle a toujours des difficultés à se maintenir (Kaczensky et al, 2013 ; Chapron et al, 2014). Cependant, la moitié des pays concernés par l’aire de répartition du lynx ont un plan d’action ou de gestion de l’espèce pour aider à sa conservation (Kaczensky et al, 2013).

En France, le Lynx est actuellement réparti sur trois noyaux de populations de lynx localisés dans les Massifs des Vosges, du Jura et des Alpes. Suite à sa disparition entre le 17^{ème} et le 20^{ème} siècle, le Lynx est tout d’abord revenu naturellement dans le Jura français dans les années 80 par la Suisse, suite à la réintroduction de 8 à 10 individus dans les années 70 (Breitenmoser et al, 1998). Puis des lâchers ont été réalisés dans le Massif des Vosges entre 1983 et 1989 (Linnell et al., 2009). Cependant, ce programme de réintroduction n’a pas abouti et la population vosgienne-palatine est toujours considérée « En danger critique » sur la Liste rouge nationale (Marboutin, 2013 ; CROC, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018). D’ailleurs, un programme de réintroduction de 20 lynx est actuellement en cours dans le Palatinat en Allemagne (Stiftung Natur und Umwelt Rheinland-Pfalz, 2015). En 2009, l’ensemble des données mortalités du massif jurassien de 1974 à 2008 ont été réétudiées dans le cadre d’un premier projet ITTECOP. Il en ressort que sur 104 individus morts, 58% des cas proviennent de collisions avec une infrastructure de transport terrestre (ITT), soit plus de la moitié (Gaillard et al. 2012). Un modèle de risque de collision est produit (Arzhela et al., soumis)

Dans ce contexte, en 2017, le projet ITTECOP ERC-Lynx est initié en vue de co-construire un outil de modélisation à l’attention d’opérateurs techniques afin de les aider à la prise de décision d’aménagement du territoire. Le logiciel prendrait en compte les données actualisées de collisions et les facteurs structurels externes, les zones à fort risque de collisions identifiées par un modèle de statistique prédictif, et la viabilité des populations de lynx, leur comportement (dispersion notamment) via un modèle spatialement explicite individu-centré (SEPVA) et une interface étudiée pour des utilisateurs non spécialisés (CEFE-CNRS, Cerema, CROC, ONCFS, 2017). D’après un premier stage ERC-Lynx mené par C-A Oliver (2018) au CROC, il existe un réel problème de continuité écologique pour cette espèce. Son rapport, basé sur la comparaison de méthodes de modèles de corridors possibles entre les massifs, conclut sur une discontinuité majeure entre les Vosges et le Jura. Ce second stage s’est donné un double objectif, d’une part l’acquisition de connaissances et de données supplémentaires sur les ITT pour le modèle ERC Lynx en cours de construction (atelier n°3 prévus en septembre 2019) et d’autre part, l’identification de solutions possibles et d’autres perspectives de collaboration en vue d’éviter et réduire la mortalité de lynx par collision dans le massif du Jura. Face à ces accidents, de nombreuses questions sont survenues :

Existe-t-il des hot spots de mortalité dans le Massif du Jura ? Si oui, quelles en sont les causes ? Quelles sont les caractéristiques des routes ou tronçons de route accidentogènes à l'origine d'un risque plus élevé de collision entre le lynx boréal et les véhicules de transports routiers ? La viabilité des populations étant un des enjeux du programme ERC-Lynx, existe-t-il des causes biologiques liées au comportement de l'espèce, en période de reproduction ou l'installation dans un territoire. Y-a-t-il des différences de mortalité par collision entre mâle et femelle, entre les adultes et les juvéniles ? Et sous réserve que les lynx utilisent bien des corridors pour se déplacer, existe-t-il une influence du contexte paysager sur la mortalité par collision ?

Dans ce contexte à la fois d'enjeu élevé de conservation de cette espèce rare et protégée et d'acquisition de connaissances utiles, plusieurs hypothèses scientifiques ont été abordées dans ce rapport de stage :

Hypothèse 1 : Le massif jurassien contient plusieurs hot spots de tronçons accidentogènes, il doit donc exister une typologie de route à l'origine d'un risque plus élevé de collision entre le lynx et les véhicules de transports routiers.

Hypothèse 2 : Il existe des causes biologiques liées au comportement de l'espèce qui influence cette mortalité routière.

Hypothèse 3 : De même, il est supposé que l'environnement, paysage proche joue un rôle dans la mortalité par collision.

I Matériels et Méthodes

I.I Espèce étudiée : le Lynx boréal

Le lynx boréal *Lynx lynx*, fait partie de la famille des Félidés. Cette espèce est solitaire sauf pendant la période de reproduction et l'éducation des jeunes, voire figure 1 ci-dessous. En Suisse, les femelles ont un territoire d'environ 90 km² proche les unes des autres et n'acceptent pas l'intrusions d'une congénère. Tandis que les mâles ont des domaines vitaux bien plus grands de 150 km² qui englobent celui de deux voire trois femelles, plus rarement une seule (L'équipe animatrice du réseau, 2014). Lors de la période de reproduction en février-avril, les individus recherchent leur partenaire au travers de ces vastes domaines vitaux. Il est possible que durant cette période les lynx soient plus vulnérables. Puis les couples se défont et la vie en solitaire reprend, jusqu'en mai-juin pour les femelles qui mettent bas. Durant l'été, elles font de petits déplacements pour chasser et revenir nourrir les chatons encore trop jeunes restés à la tanière. Cependant au bout de 2 mois, la mère et ses petits commencent à se déplacer. En septembre, les chatons effectuent seulement de petits déplacements,

mais très vite ils deviennent capables de suivre leur mère sur son territoire parfois très fragmenté. Là aussi, il est possible que cette période entraîne des collisions, et limite la perpétuation de la population jurassienne. Il en est de même lors de la reproduction suivante, lorsque les jeunes de l'année passée ($n+1$) deviennent indépendants. Les jeunes devenus des subadultes partent à la conquête d'un territoire, les femelles peuvent parcourir jusqu'à 480 km² et les mâles 760 km² pour devenir des résidents (Breitenmoser-Würsten et al, 2007). Cependant, peu d'entre eux arrivent à survivre à leur première année d'indépendance (Schmidt-Posthaus et al, 2002 ; Andren et al, 2006).



Figure 1 : Schéma du cycle de vie du lynx boréal. © CROC, 2019 (photo d'accouplement © A. Laurent ; photo d'un jeune et sa mère prise au piège photographique © Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz, Stiftung für Natur und Umwelt Rheinland-Pfalz

I.II Zone d'étude

La zone d'étude se situe à l'Est de la France, sur les régions Bourgogne Franche-Comté (BFC) et Auvergne Rhône-Alpes (AuRA). Elle se compose de trois départements, le Doubs (25) et le Jura (39) en BFC, ainsi que de l'Ain (01) en région AuRA. Le Massif du Jura comporte ces trois départements (Figure 2). D'après les suivis réalisés par l'ONCFS, ce massif est le plus fréquenté par l'espèce, en comparaison des massifs des Vosges et des Alpes (Figure 3 ; ONCFS, 2019).

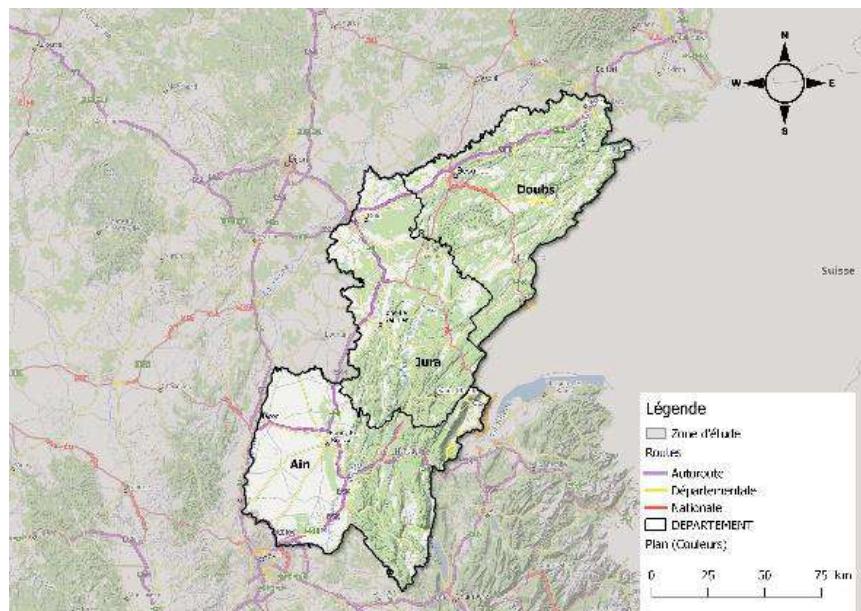


Figure 2 : Délimitation de la zone d'étude, le Massif Jurassien ; zoom sur ces 3 départements, le Doubs, le Jura et l'Ain.

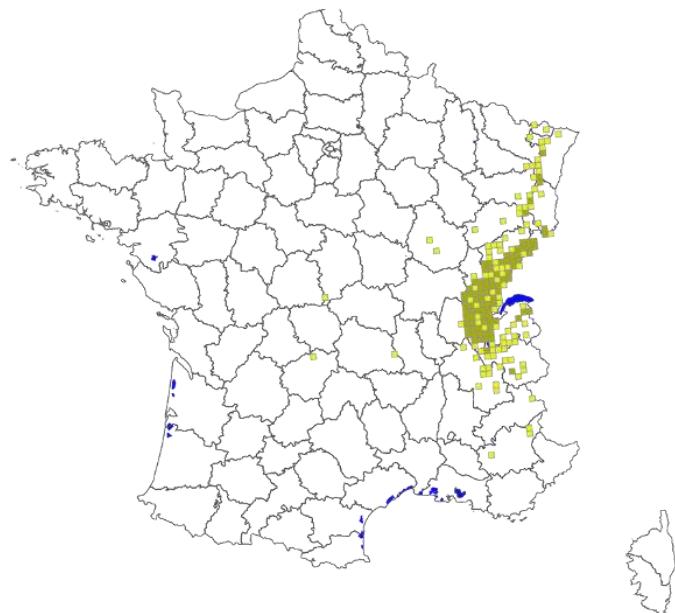


Figure 3 : Carte de répartition du Lynx boréal, en France en 2017 (ONCFS 2019). Le vert représente les zones de présences régulières tandis que le jaune correspond à la présence occasionnelle de l'espèce.

Le massif du Jura est une montagne douce en marches successives jusqu'à son sommet, Crêt de la Neige, qui culmine à 1717 mètres d'altitude. Situé entre la frontière Suisse et Française sur 340 km, il s'étend sur 14 000 km² dont 9860 km² en France. De grands axes routiers traversent le massif, notamment la RN 5 menant à Genève en traversant Poligny et Gex, mais également l'A40 entre Bourg-en-Bresse et Genève, ainsi que la RN 57 de Besançon, passant par Pontarlier pour atteindre la frontière. Ces routes suggèrent un trafic élevé entre France et Suisse, notamment par la présence de nombreux frontaliers (SRCE Franche-Comté, 2012).

I.III Collecte et structuration des données

Pour rappel la récolte des données a été réalisé pour le double objectif, d'acquisition de connaissances supplémentaires pour le modèle ERC Lynx et pour l'identification de solutions possibles afin d'éviter et réduire la mortalité de lynx par collision dans le massif du Jura. La réponse à ce double objectif nécessitait de travailler à deux échelles, la première au niveau des 3 départements cités précédemment et la seconde plus fine au niveau des tronçons identifiés comme étant les plus accidentogènes sur la base de précédents travaux (Gaillard et al., 2012 ; Morand, 2016). Différentes publications (Trombulak and Frissell, 2000 ; Clevenger et al, 2003 ; Mangfald, 2008 ; Gaillard et al., 2012 ; Snow et al, 2017) dans le domaine de l'écologie de la route nous ont guidé pour le choix des variables. Des échanges préalables avec différents acteurs, de même que la lecture des comptes rendus des ateliers 1 et 2 dans le cadre d'ERC-Lynx menées au cours des années 2018 et 2019 nous ont amené à identifier et préciser de nouveaux facteurs. Le tableau 1 ci-dessous résume l'ensemble des variables existantes et à rechercher de même que celles utilisées dans les travaux anciens et récents effectués dans le massif du Jura. Dans cet objectif, un certain nombre de partenaires avec lesquels échanger sur ces informations et données, voire les collecter ensemble sur le terrain a été contacté et/ou rencontré durant la première étape de ce stage.

Lors des journées passées aux conseils départementaux (CD) du Jura et du Doubs, au mois de mars et avril, des données fines ont été identifiées et mesurées comme la présence de clôture, ou le terre-plein central. Elles ont pu être relevées à partir des logiciels Arcopole (CD Jura) et RouteVision (CD Doubs) exploitant un fond photographique Google Street View. Ces deux logiciels permettent de se promener le long de la route sélectionnée, et de calculer, pour exemple une largeur exacte de la route. Toutefois, le temps passé à la récolte de telles données précises sera une limite pour leur exploitation dans cette étude car non disponibles aux échelles du massif, ni même de l'ensemble des tronçons les plus accidentés.

Tableau 1: Variables envisagées en début d'étude

ITT	Variables	ITTECOP 2012	Modèle ERC	Recherche info
	<u>Variables transports :</u>			
	Vitesse moyenne		X	CD, DIR
	Trafic (fréquence des véhicules, PL/VL, Changement d'heure, vacances scolaire)	X	X	CD, DIR
	Type de route (Nb de voies, largeur en m, ouvert ou tunnel)	X		CD, DIR, SIG
	Signalétique			CD, DIR, Terrain
	Densité des routes (km/km ²)			CD, DIR, SIG
	<u>Variables aménagements :</u>			
	Type de clôture (Présente, Grande faune, petite faune, spécifique Lynx)			CD, DIR, SIG, Terrain
	Végétation de bas-côté (rase/gestion intensive, haute/fauche tardive, visibilité)		X	CD, Terrain
	Sinuosité			CD, DIR, SIG
Voies routières	Type de terre pleins central			CD, SIG, Terrain
	Végétalisation du terre-plein			CD, SIG, Terrain
	<u>Variables éco-aménagements :</u>			
	Localisation de passage à faune			CD, DIR, FDC, Asso, SIG
	Type de passage			CD, DIR, FDC, Asso, SIG, Terrain
	Efficacité du passage			CD, DIR, FDC, Asso
	<u>Autres variables :</u>			
	Collisions autres animaux			FDC, Asso
	Salage			CD, DIR

I.IV Les données et variables utilisées

Données de « Lynx morts » par collision

En 1988, l'ONCFS crée le réseau Lynx et réalise un suivi de cette espèce protégée. A l'aide de collaborateurs professionnels et bénévoles formés sur le territoire, les indices de présences sont relevés (Office National de la Chasse et de la Faune Sauvage, 2017). Lorsque l'un de ces animaux est retrouvé mort, les représentants locaux de l'ONCFS sont prévenus et viennent chercher la dépouille. Ainsi, ils relèvent les coordonnées GPS, la date estimée de la collision, l'âge, le sexe de l'individu, si cela est encore possible, et le font autopsier auprès de cabinets vétérinaires afin de déterminer la cause de la mort et différentes informations (état sanitaire, etc...).

Un extrait de ce tableau nous a été communiqué par l'ONCFS, l'un des partenaires au projet ERC-Lynx. Les données du tableau Collisions_Lynx1 sont datées de 1982 jusqu'à début 2018 et représentent 111 individus. Nous avons fait le choix de supprimer pour les analyses statistiques, les individus indéterminés ainsi que ceux comportant des occurrences non renseignées dans certaines variables (n/a), reste n = 97 individus (fichier acm04). A partir de l'information « date de la collision », une variable « période scolaire » a été construite à l'aide de la source et site « www.very-utile.com/vacances-scolaire.education » en vue d'étudier cet effet sur le risque de collision en période de vacances, notamment lors de la saison touristique hivernale. En effet, le Massif du Jura comprend de nombreuses stations de ski. Enfin, la phénologie (saison biologique) est une autre variable construite à partir de la donnée brute « date estimée de la collision ».

Données et variables liées aux routes

Nous avons fait le choix d'étudier les tronçons de routes comportant une collision et leur environnement de part et d'autre d'un rayon de 500 mètres, soit un kilomètre de route. Pour caractériser ces tronçons, les points GPS des collisions ont été projetés sur une carte puis à l'aide du logiciel QGIS des linéaires ont été construits afin de générer de nouvelles variables éco-paysagères.

Variable « limitation de vitesse » :

Les limitations de vitesses sur les tronçons de route ont été relevées à partir des photos de Google Street View, grâce à la localisation GPS des collisions. Le changement de vitesse de 90 km/h à 80 km/h est rentré en vigueur le 1^{er} Juillet 2018, et ne concerne donc pas les accidents lors de cette étude. Cependant, les dates des photos Google varient de 2015 pour les plus anciennes à 2018, et pourraient induire des erreurs. Il a donc été choisis pour palier à ce biais, de créer 3 modalités de classe de vitesse : 30 à 70 km/h, 80 à 90 km/h et 110 à 130 km/h. Le choix de ces classes a également été influencé par une étude espagnole sur le Lynx pardelle (*Lynx pardinus*) qui prouvait la présence d'un palier à 80-90 km/h au-dessus duquel les collisions étaient moins évitées. (Garrote et al, 2018).

Variable « type d'infrastructures routières » :

Le présent rapport ne tient pas compte des voies ferroviaires (environ 5% des accidents en France) (Gaillard et al., 2012) mais à la place, intègre les routes communales. Les routes forestières n'étant pas tracées, elles ne seront pas étudiées. La variable a été construite en 4 modalités comprenant les autoroutes, les routes nationales et départementales ainsi que les routes communales. Les données concernant cette dernière catégorie ont été relevées soit par l'ONCFS directement sur le terrain lors de la découverte de cadavre, soit sur SIG par projection des points de collisions sur un fond de carte du réseau routier.

Variable « nombre de voies » :

Le site BD TOPO recense la largeur des routes ainsi que le nombre de voies. Toutefois, l'imprécision de cette mesure que confirme Olivier (2018) et nos recherches sur google Streets View, nous ont amené à ne garder que le nombre de voies dans la suite de l'analyse. Cette variable sera subdivisée en deux modalités, les routes bidirectionnelles ainsi que les routes comportant plus 2x 2 voies.

Variable « sinuosité » :

Suite aux échanges avec plusieurs experts du Lynx rencontrés lors de ce stage, la sinuosité de la route pourrait être un facteur de collisions. Quelques visites de terrain sur les tronçons confirment que les accidents semblent survenir après le passage d'un virage. Cette variable a été généralisée et construite sur SIG à partir du logiciel QGIS, en mesurant à partir de la fonction mesure de segment, les distances dites à vol d'oiseau, prise entre les extrémités de chaque tronçon. Il a été ensuite appliqué la formule suivante :

$$\text{Sinuosité} = \frac{\text{Distance réelle} - \text{Distance à vol d'oiseau}}{\text{Distance à vol d'oiseau}} \times 100$$

Puis elle a été classée en deux catégories, les tronçons peu sinueux < 5, et les tronçons qui présentaient une sinuosité > 5.

Données « occurrence de lynx » :

La distribution et la densité des Lynx dans le Massif du Jura influencent la probabilité des collisions (Gaillard et al., 2012). Il est donc attendu que les accidents se situent davantage en zone de présence régulière de l'espèce, car plus il y a d'animaux et plus il y a de risque d'accidents routiers avec cette espèce. Chaque année, la structure établie des cartes de présence de l'espèce sur 1km² à partir d'indices collectés sur le terrain. La couche de présence Carmen 2017, mise en ligne par l'ONCFS sera utilisée en vue de construire une nouvelle variable en trois classes soit présence régulière, présence occasionnelle et absence.

Données environnementales et variables éco-paysagères :

L'utilisation de Corine Land Cover en ce qui concerne le paysage et l'environnement proche du point de collision, offre 5 grands types d'habitats qui sont, les territoires artificialisés, les territoires agricoles, les forêts et milieux semi-naturels, les zones humides et les surfaces en eau. L'utilisation des deux logiciels SIG, QGIS et ArcGIS a été nécessaire à la construction de ces variables à partir de zones tampons réalisées sur 500 mètres de rayon. Elles ont différentes classes présentées ci-dessous.

Le Territoire Artificialisé est composé de 4 classes en pourcentage : Peu artificialisé < 7 ; moyennement artificialisé de 7 à 14 ; assez artificialisé de 14 à 21 et artificialisé > 21. Le territoire agricole et les forêts et milieux semi-naturels ont été construites de la même façon, en 4 classes de 25 en 25 %, en peu, moyen, agricole ou forestier et très. Et pour finir, les zones humides et la surface en eau ont seulement 2 classes, absence quand il n'y en a pas et présence à partir 1%.

I.V Analyses statistiques

I.V.1 Analyses univariées et bivariées

Toutes les variables présentes dans cette étude ont été construites sous forme qualitative en 2 ou plusieurs modalités. Afin de connaître la répartition des données de « lynx morts par collisions » suivant leurs modalités, des tests binomials ou des χ^2 d'ajustement ont été effectués sous RStudio.

Des analyses bivariées ont été faites sur les variables biologiques liées à l'âge et au sexe des individus et leur influence ou non dans les probabilités de collision. Les tests de χ^2 d'indépendance et les tests de Fisher ont été réalisés à l'aide du logiciel XLSTAT, une extension ajoutée au logiciel Excel qui donnent automatiquement les différences réalisées avec les tests de post-hoc.

I.V.2 Statistiques multivariées : Analyse des Correspondances Multiples (ACM)

Variables et modalités

Afin de réaliser une ACM, le jeu de donnée doit être revu. Ce type d'analyse n'aime pas les extrémités, mise en évidence par les statistiques univariées. Plusieurs modalités ont donc été fusionnées en une seule, les variables Territoires artificiel et agricole n'ont plus que trois modalités, et l'occurrence plus que deux. Une fois les classes de revue, certaines variables sont écartées car elles présentent des classes de modalités difficilement maniables face à ces extrêmes, tels que les zones humides et la surface en eau. Puis les jours et les mois sont également supprimées de cette analyse à cause d'un trop grand nombre de modalité. Une dernière étape doit également être respectée. Il est nécessaire d'écarter de l'analyse les variables trop liées les unes aux autres. Pour cela des tests de χ^2 d'indépendance et des tests de Fisher sont effectués sous RStudio. L'ACM est réalisée sur les variables suivantes : Type de route ; Sinuosité ; Occurrence ; Territoire artificiel ; Territoire agricole ; Forêt et milieux semi-naturel.

Variable complémentaire à l'ACM

Dans l'analyse, les variables sexe, semaine, saison et période scolaire sont traitées en tant que supplémentaires ou illustratives, c'est-à-dire qu'elles n'interviennent pas dans la construction des dimensions mais seront seulement projetées sur les axes les plus significatifs.

I.VI Analyse spatiale par Système Informatique Géographique (SIG).

Afin de compléter les analyses statistiques, des analyses spatiales ont également été réalisées grâce au logiciel QGIS. A partir des données de mortalités de l'ONCFS, de 1982 à 2018, plusieurs cartes de chaleurs ont été créées à différents pas de temps. Ce traitement met en avant des points

noirs, c'est-à-dire des secteurs où les collisions sont les plus denses, et demandent une action rapide des gestionnaires pour réduire l'impact. Aux cartographies ont été insérés des graphiques, sortis de tableaux dynamiques réalisés sur logiciel excel, de manière à mieux appréhender la répartition des collisions suivant les années.

Dans le but de prendre en compte d'autres variables dans une potentielle typologie de routes meurtrières, une carte sur l'altitude a été réalisée ainsi que plusieurs cartes zoomées sur les points noirs, à la rechercher de continuité écologique. De même, de façon à avoir une gestion adaptée plus fine à la réduction de la mortalité, une dernière cartographie a été créée sur la géolocalisation des individus tués selon leur âge et leur sexe.

II Résultats

II.I Récolte de données

Le bilan de la récolte des données suite à la rencontre d'acteurs, la consultation de leur base de données, l'analyse et l'exploitation de leur logiciel mais également de Street View rend compte d'une part, d'une grande hétérogénéité des données et d'autre part du très faible nombre de variable exploitable à l'échelle du massif voire à l'échelle d'un département et donc de l'ensemble des tronçons accidentogènes.

Le tableau 2 récapitule cette information, il a été présenté lors d'une réunion PNA Lynx, le 11 et 12 avril 2019, afin de relancer une dernière fois certains acteurs présents. L'alimentation du modèle ERC-Lynx par de nouvelles variables récoltées sur les trois départements ne sera pas possible dans le temps imparti de ce stage. La difficulté de rassembler les données existantes, voire de récolter sur le terrain de nouvelles données, suppose une mobilisation plus soutenue de la part de tous les acteurs intéressés par une telle problématique et enjeu.

Tableau 2 : Premier bilan de la récolte des données effectuée dans le cadre de ce stage.

Données (routes) utilisées dans le modèle		Données (routes) revisitées et/ou nouvelles (ce stage)		
		Acquises		Demandées
		Départements	Tronçons accidentogènes	
Volume du trafic journalier (Nb moyen veh/jours/année)	Proxie	VT/PL sur une année (CD25-39)		CD 01 / DIR Est / DIR Centre Est / APRR
Vitesse (lim. max. + V85)	Proxie (lim. max.)	V85 (CD 25)		CD 01 / CD 25 / CD 39 / DIR Est / DIR Centre Est / APRR
Type de route (Nb voies + largeur)	route500 (IGN)	Largeur, Nb de voies (CD25-39)		CD 01 / DIR Est / DIR Centre Est / APRR
Petits aménagements (Clôture, TPC, GBA, autres)	/	/	RN + RD (25 - 39)	CD 01 / APRR
Entretien des routes (végétation, salage)	/	CD (25-39) + APRR (salage)		CD 01 / DIR Est / DIR Centre Est / APRR
Ouvrages de franchissements (PF, mixte)	/	/	PF Orchamps-Vennes	CD 01 / DIR Est / DIR Centre Est / APRR / FDC 01 / FDC 25 / FDC 39

II.II Analyses univariés

- a) Existent-ils des différences au sein des classes d'âge (adultes et jeunes) ainsi qu'entre les sexes (mâle et femelle) des lynx trouvés morts par collision ?

Le jeu de données comporte le même pourcentage de jeunes que de femelles, soit 52.58 % contre 47.42% d'adultes et de mâles. Cependant, les deux tests binomiaux effectués successivement sur l'âge et sur le sexe ne sont pas significatifs, avec une même p-value de 0,6879. La répartition des collisions est donc homogène, il n'y a pas de distinction d'âge, ni de sexe.

- b) Est-ce que les collisions surviennent plus souvent en semaine ou le week-end ? Existe-t-il une différence en fonction des jours de la semaine ?

Pour les jours de la semaine, la répartition semble homogène avec une tendance plus faible pour le samedi, 12,37% et le dimanche 11.34%. Tandis que le mercredi et le lundi sont les jours les plus représentés avec 17.53% et 16.49%. Le test de X^2 réalisé ici justifie de l'homogénéité des données avec une p-value de 0.9879. Cependant, cette tendance est accentuée sur le second graphe (Annexe 3) où 76.29% des collisions ont lieu la semaine contre 23.71% le week-end. Ici la p-value étant de 2.027^{-7} , il y a donc bien une différence significative des collisions qui arrivent plus souvent la semaine.

- c) Existent-ils une différence du nombre de collision selon les mois ? Existe-t-il une différence entre les saisons ?

Les deux diagrammes pour ces variables montrent des répartitions très hétérogènes. Pour les mois de l'année, deux grands pics sont représentés en octobre avec 18.56% des collisions et 17.53% en décembre, et un troisième pic plus faible 13.4% en novembre. Les mois de l'année qui présentent le moins de collisions sont de mai à septembre, entre 4.12% et 5.15% des accidents relevés ainsi que pour janvier et février avec 5.15%. Les mois de mars et avril étant entre deux avec respectivement 7.22% et 10.31% des collisions à l'année. Concernant les saisons, un pic est visible en automne avec 49.48% des collisions, à contrario l'été étant la saison la moins accidentée avec 14.43%. Les tests de X^2 effectué sur ces variables sont tous deux significatifs avec des p-value de 1.922^{-4} et 7.1^{-7} , ainsi que pour les post-hoc significatifs pour les mois d'octobre et décembre ainsi que pour l'automne.

- d) Existe-t-il une augmentation des collisions durant les vacances scolaires ?

La comparaison entre périodes de scolarité et de vacances n'a pas d'incidences sur le nombre de lynx retrouvés morts sur les routes, les résultats n'étant pas significatif (répartition homogène, test binomial et p-value = 0,68).

- e) Quelle influence des variables « transport » (vitesse, type d'infrastructure routière, nombre de voies et sinuosité) sur le nombre de collision ?

Les tests de χ^2 effectués sur les variables limitations de vitesse et type de route ainsi que les tests binomiaux réalisés sur le nombre de voies et la sinuosité, montrent tous des répartitions hétérogènes, avec des p-value inférieures à 0.05. Elles sont dans l'ordre de 2.859^{-14} , 2.2^{-16} , 1.153^{-9} et 3.804^{-5} , les post-hoc étant également significatifs sur les modalités présentant un pic. D'après la figure 7, 71.13% des collisions qui ont lieu sur des routes dont la limitation de vitesse est comprise entre 80 et 90 km/h, tandis que les deux autres classes ont 14.43% des collisions. Pour la nature des routes, la majorité des collisions se situent sur les départementales 62.77%, puis les nationales 22.34% et pour moins de 10% sur les autoroutes et les routes communales. Plus de 80 % surviennent sur des voies bidirectionnelles, et des routes peu sinueuses 71.13%.

- f) Existent-ils des différences du nombre de collision en fonction de la répartition et densité de lynx dans l'aire d'étude ?

D'après le χ^2 effectué sur cette variable (p-value = 2.2^{-16}), les collisions sont réparties en majorité 74.23% sur des zones de présence régulière du lynx. Pour 22.68% des cas en présence occasionnelle et seulement 3.09% dans les zones d'absences de l'espèce.

- g) Existe-t-il une influence des types d'habitats sur le nombre et la localisation des accidents ?

Les variables habitats présentent toutes un test significatif avec pour l'artificialisation des sols un p-value de 2.2^{-16} , 3.683^{-9} en agriculture, pour les forêts et milieux semi-naturels 0.004681, et enfin une même p-value de 2.2^{-16} pour les zones humides et la surfaces en eau. Les collisions sont réparties à 68.04% sur des territoires peu artificialisés, à 51.55% sur des sols peu agricoles mais à 38.14% dans des milieux très forestier et 28.87% forestier et en absence d'eau.

II.III Analyses bivariés

- a) Est-ce que le sexe des lynx tués par collision diffère selon leur âge ?

Suite à un test de χ^2 d'indépendance effectué, il n'y a pas de différence significative (p-value de 0.373). Il y a autant de jeunes mâles et femelles qui se font tuer par la route que de mâles et femelles adultes.

- b) Y a-t-il une influence des jours sur l'origine de l'âge des lynx morts ? Ou bien de la semaine ?

Des χ^2 d'indépendances ont été réalisés sur ces variables mais ne sont pas significatifs, avec un p-value de 0.110 pour les jours et 0.965 pour la semaine. L'âge des animaux n'est donc pas influencé par les jours ou la semaine.

c) Et sur le sexe ?

Les p-values des tests de χ^2 sont de 0.884 pour la variable jours et 0.965 pour la variable semaine, il n'y a donc aucune influence des jours ou de la semaine sur le sexe des lynx.

d) Existent-ils un effet des saisons (voire des mois de l'année) sur le nombre et le type de lynx tués (sexe, âge) ?

D'après le test de Fisher dont la p-value est de 0.006, il existe des différences d'âge selon certain mois de l'année. Il en est de même pour les saisons avec une p-value de 0.005. Les jeunes ont tendance à se faire tuer plus facilement en octobre, lors de l'automne. Pour les adultes, le mois de juillet serait le plus meurtrier mais voir tableau 3 et 4.

Tableau 3 : Significativité par case sur les variables Age / Mois. Les valeurs affichées en rouge sont significatives au seuil alpha=0,05.

	Aout	Avril	Décembre	Février	Janvier	Juillet	Juin	Mai	Mars	Novembre	Octobre	Septembre
Adulte	>	>	<	>	<	>	>	<	>	<	<	<
Jeune	<	<	>	<	>	<	<	>	<	>	>	>

Tableau 4 : Significativité par case pour les variables Age/Saison. Les valeurs affichées en rouge sont significatives au seuil ou alpha=0,05.

	Automne	Ete	Hiver	Printemps
Adulte	<	>	>	>
Jeune	>	<	<	<

e) Et avec la variable sexe ?

Les tests réalisés sur ces variables donnent des p-values de 0.788 pour les mois de l'année et 0.936 pour les saisons. Il n'y a donc pas d'influence sur le sexe des lynx tués.

f) Existe-t-il un effet des vacances sur le nombre et l'âge des individus retrouvés morts ? et sur le sexe ?

Que ce soit sur l'âge ou sur le sexe des animaux retrouvés morts par collisions, les périodes scolaires n'ont aucune influence. Les p-values des tests effectués donnent une réponse de 0.299 pour l'âge et de 0.837 pour le sexe, soit supérieure à 0.05.

II.IV Statistiques multivariées par analyse des correspondances multiples (ACM)

a) Jeu de données

Le tableau ci-dessous rend compte des variables corrélées entre elles, il s'agit donc d'en supprimer quelques unes de l'ACM afin de diminuer leur poids et contribution dans l'analyse. Les valeurs à l'intersection colorées en vert sont corrélées. Le choix s'est porté sur les variables « Age », « Lim.V » et « NB.V ». Les variables de proportion d'habitats ont été conservées de même que celles informant du type de route et de la sinuosité.

Tableau 5 : Tableau récapitulatif des p-values après tests X^2 ou Fisher. En vert, p-values significatives <0.05. PS = Période scolaire ; Lim.V = Limitation de vitesse ; Typ.R = Type de route ; NB.V = Nombre de voies ; Si = Sinuosité ; Art = Territoire artificiel ; Agr = Territoire agricole ; Fo = Forêts et Milieux semi-naturels.

	Age	Sexe	Semaine	Saison	PS	Lim.V	Typ.R	NB.V	Si	Occurrence	Art	Agr	Fo
Age		0,3735	0,9646	0,004	0,2988	0,4718	0,072	0,6121	0,9006	0,5947	0,09	0,2564	0,0065
Sexe			0,9646	0,933	0,8374	0,1344	0,3308	0,308	0,3066	0,1438	0,2459	0,7731	0,6632
Semaine				0,7006	0,5436	0,3928	0,1919	0,5495	0,8492	0,2581	0,2429	0,4908	0,8291
Saison					0,2599	0,3913	0,6147	0,3898	0,095	0,1079	0,057	0,1394	0,2364
PS						0,071	0,3093	0,4777	0,9062	0,6186	0,914	0,006	0,001
Lim.V							0,0005	0,0005	0,0685	0,3268	0,001	0,0495	0,007
Typ.R								0,0005	0,2104	0,1894	0,3738	0,0545	0,002
NB.V									0,0491	0,3484	0,5387	0,2654	0,022
Si										0,1539	0,4563	0,4723	0,6827
Occurrence											0,055	0,2369	0,9315
Art												0,0485	0,1579
Agr													0,0005
Fo													

b) ACM

D'après le tableau résumé de l'ACM en annexe 4, la dimension 1 explique 15.988% de l'inertie totale, la dimension 2 à 14.466%, la dimension 3 à 11.749%, et la dimension 4 à 9,882%. Les autres dimensions sont bien inférieures à 10%, et ne seront pas gardées. La répartition des modalités sera étudiée selon les deux premières dimensions.

Concernant les 47 premiers individus, nous pouvons observer trois groupes distincts mis en valeur par des ellipses rouges. Les individus les mieux projetés sur ces deux axes sont répartis dans ces groupes : les 23 et 37 selon la dimension 1 dans le groupe 1, les 22 et 34 selon le second axe dans le groupe 2 et enfin les 3 et 29 suivant la dimension 2 dans le groupe 3, voir figure 4.

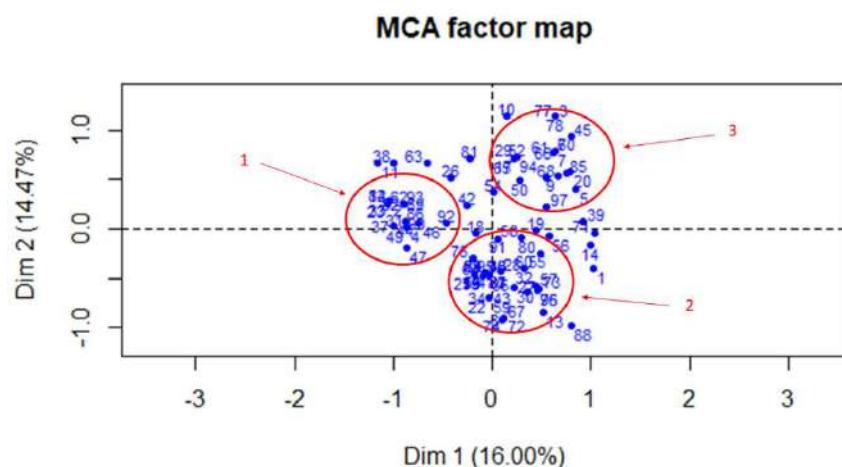


Figure 4 : Graphique de la répartition des individus de l'ACM suivant les dimensions 1 et 2, réalisé sous RStudio.

D'après la figure 5 et le tableau en annexe 4, nous retrouvons également 3 groupes pour les variables actives. Les départementales, les territoires très agricoles et peu forestiers sont les plus robustes pour former le groupe 1, les nationales et les milieux très forestiers pour le groupe 2, et les autoroutes entourées de milieux agricoles et forestières constituent le groupe 3.

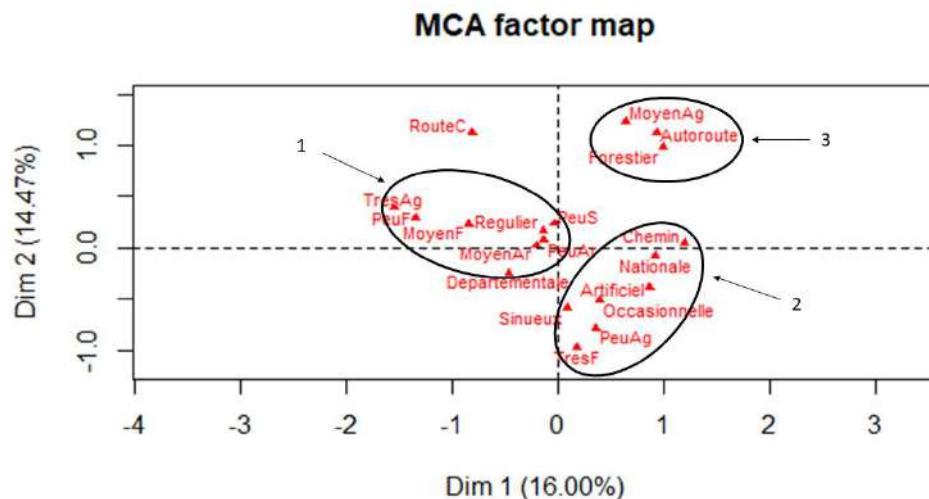


Figure 5 : Graphique de la répartition des modalités des variables actives sur les dimensions 1 et 2, réalisé sous RStudio.

Et enfin pour les variables supplémentaires, un groupe est situé au centre des axes et deux modalités sont exclues ; l'été et les vacances (Figure 6). Ces dernières sont d'après le tableau en annexe 4, les mieux projetées sur ces deux axes.

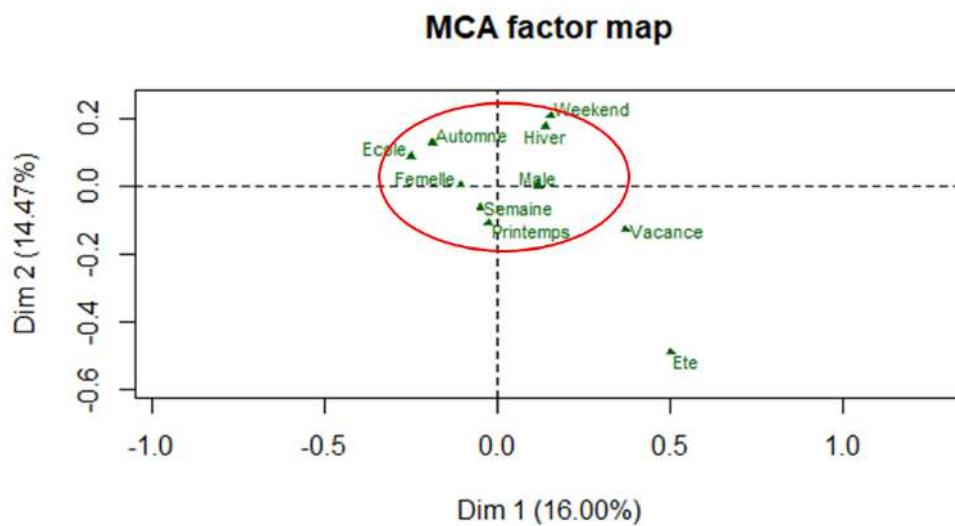
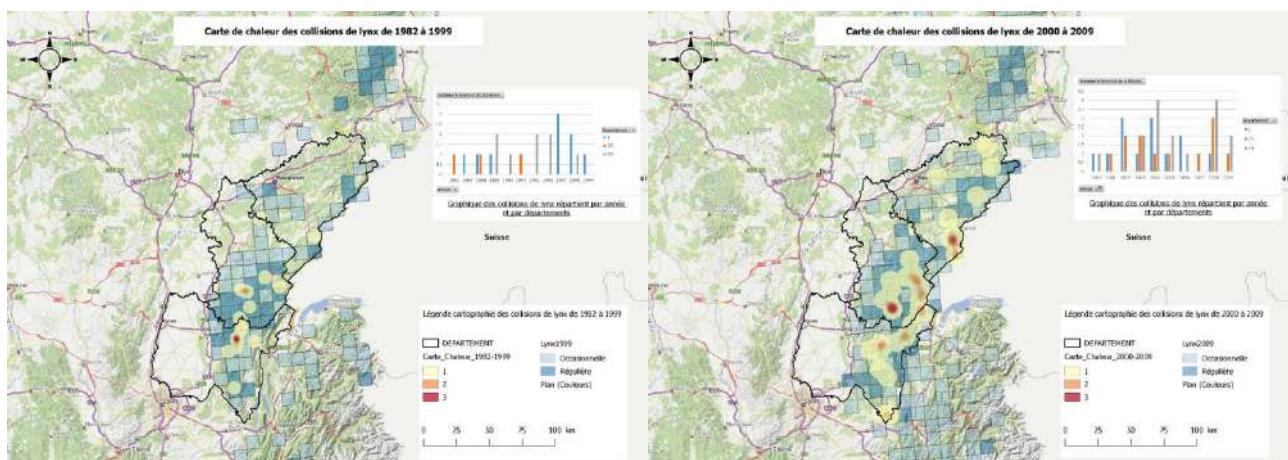


Figure 6 : Graphique de la répartition des modalités des variables supplémentaires suivant les dimensions 1 et 2, réalisé sous RStudio.

II.V Analyse spatiale par Système Informatique Géographique (SIG)

D'après la première carte de 1882 à 1999, un point noir se situe dans l'Ain sur l'A404 vers Montréal-la-Cluse. Un deuxième point moins accidenté est localisé dans le Jura sur la RD 470 vers Orgelet. Ces deux secteurs sont entre des zones de présences occasionnelle et régulière d'après la couche de présence du lynx en 1999. Entre 2000 et 2009, la carte laisse apparaître plusieurs points chauds. Dans le Doubs sur la RN 57 deux d'entre eux sont visibles. Le premier vers La-Cluse-et-Mijoux avec 3 collisions ou plus en présence régulière, et le second moins fort vers Jougne en présence occasionnelle. Dans le Jura, le point noir le plus meurtrier est sur la RD 470 à Villards-d'Héria en présence régulière et trois autres points un peu moins meurtriers sur la RN 5 vers Saint-Laurent en Grandvaux et l'Ain, en présence régulière pour les plus au Nord et présence occasionnelle pour celui à la limite du département. Concernant l'Ain, un point chaud de deux collisions est localisé à proximité de celui découvert entre 1882 et 1999. Il se situe sur l'A40 à Nantua toujours entre les deux zones de présence. Deux pics sont représentés dans le graphique, en 2004 et 2008 avec 4 collisions dans le Jura. Entre 2010 et 2014, un point chaud ressort en particulier dans le Doubs, sur la RD 461 à Orchamps-Vennes, et un second moins important qui revient à La-Cluse-et-Mijoux, tous deux en présence régulière. Un pic est toujours atteint dans le Jura en 2011 mais celles-ci sont réparties sur le territoire. Entre 2015 et 2018, deux points noirs sont visibles dans le Doubs, sur la RN 5 à Marmirolle et toujours à La-Cluse-et-Mijoux, en présence régulière. Le Jura affiche également deux points chauds mais moindres, sur la RD 678 à Bonlieu et sur la RN 5 à Morbier. Le premier étant en présence régulière et le second entre deux. Ici, deux pics sont visibles dans le Jura en 2017 et dans l'Ain en 2015, figure 7.



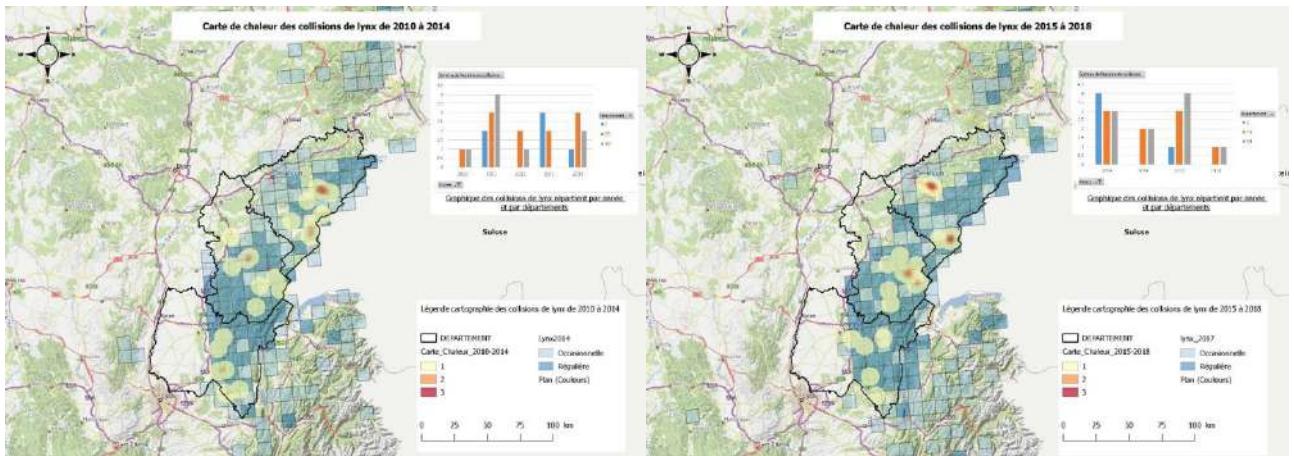


Figure 7: Cartes de chaleur des collisions de lynx. En haut à gauche de 1982 à 1999 ; en haut à droite de 2000 à 2009 ; en bas à gauche de 2010 à 2014 ; en bas à droite de 2015 à 2018

La carte de chaleur sur l'ensemble des données met en évidence quatre secteurs comportant 5 collisions et plus. Un dans le département du Doubs entre Pontarlier et la frontière Suisse sur la RN 57 ; deux dans le Jura, vers Morbier sur la RN 5 et sur la RD 470 à Villards-d'Héria ; et enfin un dans l'Ain au croisement des autoroutes A404 et A40 vers Nantua, voir figure 8. Tous sont d'après la répartition des lynx en 2017, en zone de présence régulière. Le graphique apporte une information supplémentaire avec des pics de collisions le plus souvent dans le Jura. Cependant, si on ajoute les trois départements ont obtient cinq années très meurtrières, 2004, 2008, 2011 et 2015 qui ont un pas de temps d'environ 4 ans puis plus proche 2017.

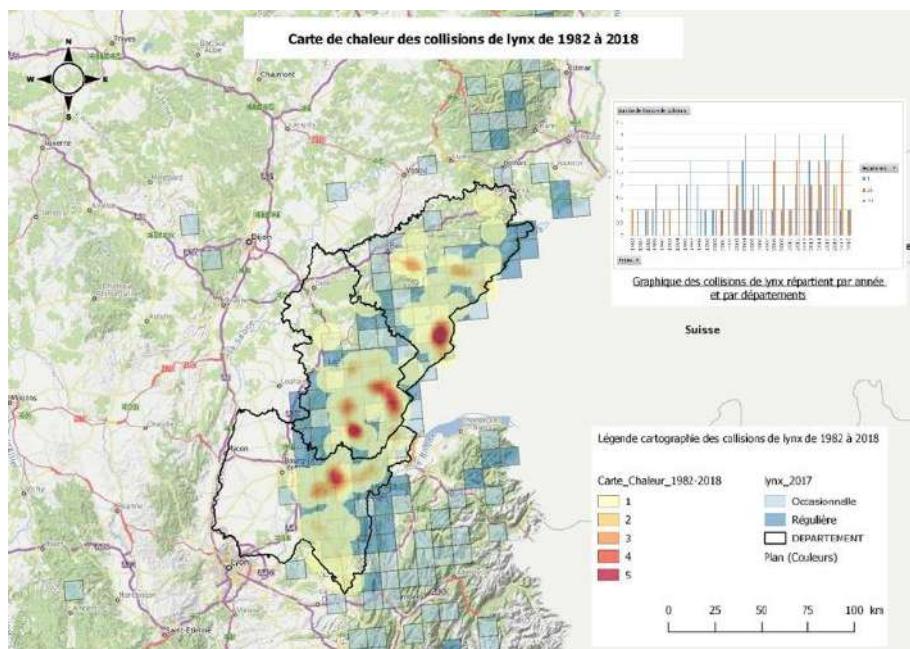


Figure 8 : Carte de chaleur sur les collisions routières du Lynx dans le Massif du Jura entre 1982 et 2018, réalisée sur QGIS.

Suite à l'analyse des points noirs des zooms ont été réalisés sur les secteurs. Tous ces tronçons comportent des forêts de part et d'autre de la route, voir annexes. Ils sont donc une barrière aux corridors écologiques.

D'après la cartographie ci-dessous, les accidents entre lynx et véhicules se situent en majorité entre 521 et 1749 mètres d'altitudes. Quelques rares collisions se trouvent plus en plaine entre 184 et 520 mètres (Figure 9). Les deux routes nationales identifiées en tant que très accidentogènes (RN57 et RN5) sont comprises entre 747 et 1 346 mètres, tandis que la départementale (RD470) du Jura et les deux autoroutes de l'Ain (A404 et A40) sont entre 521 et 1013 mètres.

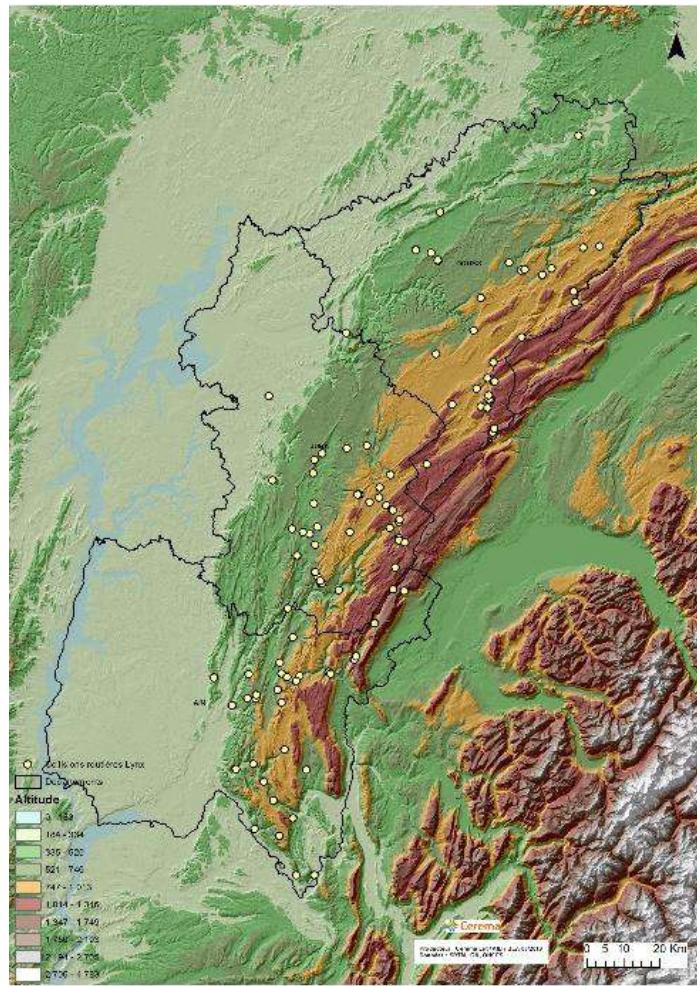


Figure 9 : Cartographie des données mortalités vis-à-vis de l'altitude

D'après la figure 10, l'Ain semble toucher plus de mâles et plus de jeunes au niveau de son point noir mais le graphique donne une répartition de la mortalité équivalente entre les modalités. Ce qui n'est pas du tout le cas pour le Jura, qui semble que les femelles et plus précisément les jeunes se feraient tuer. Mais par contre la carte indique que ce sont les jeunes mâles qui se font le plus heurter à Villards-d'Héria, et une répartition plutôt homogène à Morbier. Dans le Doubs à La-Cluse-et-

Mijoux, il semblerait que les femelles adultes soient les plus accidentées tandis que le graphique situe cette modalité dans la moins impactés et les mâles adultes les plus menacés.

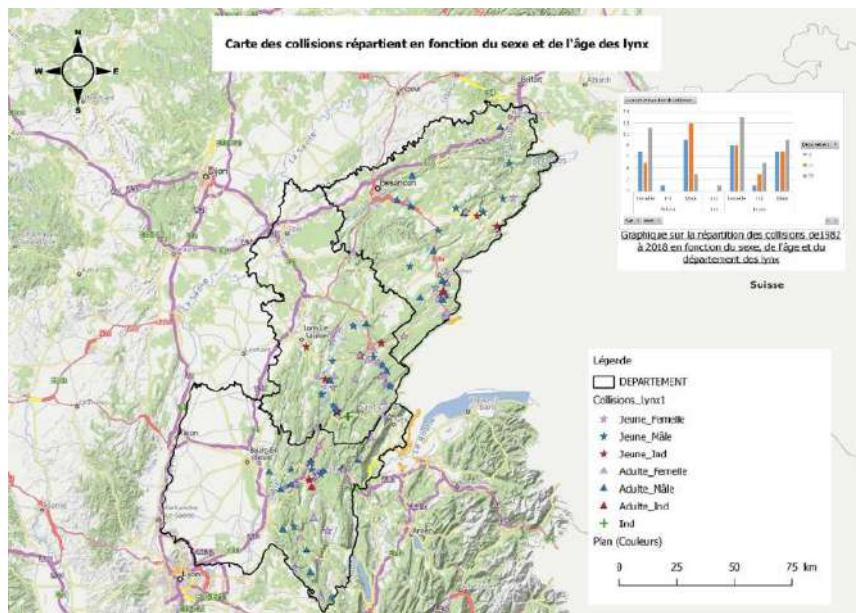


Figure 10 : Cartographie des collisions suivant le sexe et l'âge des individus.

V Discussion

Le Lynx boréal est une espèce en danger sur la liste rouge de l'IUCN, dont l'une des premières causes de mortalité a comme origine les collisions routières. Cette étude a été menée de sorte à avoir des éléments de réponses sur l'existence de hot spots de mortalité dans le Massif du Jura ainsi que d'éventuelles typologies de routes accidentogènes. En parallèle d'autres questions ont été abordées, d'une part sur la biologie et le comportement de l'espèce pouvant intervenir dans les facteurs de collisions, et d'autres parts sur l'influence d'un contexte paysager.

Recherche d'une typologie des routes les plus accidentogènes.

Une relation est possible entre type d'infrastructure et collisions, d'après les tests univariés, les accidents surviennent le plus souvent sur des routes départementales, avec une limitation de vitesse comprise entre 80 et 90 km/h, sur 2 voies et dans des zones peu sinuueuses. Certes, la limitation de vitesse et le nombre de voies ne sont pas ressortis comme étant des variables discriminantes et significatives dans l'ACM même si le rapport de corrélation montre une influence du type de route (Annexe 4). De nouvelles questions apparaissent ici, est-ce bien une influence de la nature de la route et leur vitesse associée ou bien leurs aménagements tels que l'absence de clôtures qui pourraient engendrer des collisions, voire les deux. D'après Garrote (2018), la vitesse influence les collisions,

rarement évitées au-delà des 90 km/h. Parallèlement la note technique du Sétra (2006) insiste sur la présence de clôture qui réduit fortement l'accidentologie.

Les départementales présentent quant à elles des tronçons parmi les plus accidentogènes, ce que confirme partiellement la carte de chaleur qui met en évidence la départementale RD 470 très accidentogène. Cette différence de résultat pourrait être liée au fait que les routes départementales sont beaucoup plus représentées sur le territoire que les autres types de routes. Gaillard et al., (2012) montre que les routes à risque élevé de collisions sont les autoroutes et les nationales, que nous retrouvons également en tant que hot spots dans notre carte de chaleur. Il est à noter que la seule départementale RD 470 contenant des points noirs est une ancienne route nationale déclassée en 1970. Il serait donc intéressant de rapporter le type de route à la disponibilité de cette variable sur l'ensemble du territoire.

Influence de la biologie et comportement du lynx sur le risque de collision

En ce qui concerne l'influence du sexe ou de l'âge des lynx morts par collision, il semble y avoir un effet significatif sur l'âge des lynx. Les tests univariés montrent des différences sur les mois de l'année et les saisons. Les mois d'octobre et décembre, soit en automne, présentent plus de collisions, que le restant de l'année. De plus, celles-ci surviennent le plus souvent sur de jeunes individus, d'après les tests de Fisher, tableaux 3 et 4. Tandis que la saison d'été est la moins meurtrière, avec de juillet à septembre, un pourcentage de collisions plus faible. Dans l'étude de Gaillard et al., (2012), la variable saison est également identifiée comme réponse significative sur les jeunes individus en automne et en hiver.

L'effet « saison » se retrouve dans l'ACM, le rapport de corrélation des variables supplémentaires suivant les dimensions 1 et 2, identifie l'été comme étant une modalité significative. La biologie de l'espèce explique quelque peu ces résultats. Les femelles ont une portée de 1 à 4 chatons entre mai et juin (Raydelet, 2006). Durant les premiers mois des petits, les mères chassent aux alentour et s'éloignent peu de leur cachette bien isolée (Déom, 2015) Ce comportement peut expliquer la diminution des collisions durant l'été. A la fin de celui-ci, les jeunes sont assez grands pour suivre leur mère qui doit se déplacer en quête de nourriture (Raydelet, 2006). Ce sont lors de ces déplacements que la famille serait la plus vulnérable aux collisions ce que semble confirmer plusieurs observations de jeunes et de femelles mortes. On peut supposer un certain apprentissage de la traversée de la route des mères aux jeunes réduisant le risque de mortalité.

Cette hypothèse pourrait renvoyer à l'éthologie de l'espèce suivant leur âge. Dans cette étude, aucune distinction n'a été faite pour les subadultes. D'après Zimmermann (1998), les subadultes doivent rapidement trouver des habitats optimaux pour leur survie, notamment durant leur première

année d'indépendance. Ils recherchent des domaines vitaux dont ils connaissent bien la zone et dont ils ont l'exclusivité. Environs 50% des individus meurent durant leur première année (Schmidt-Posthaus et al., 2002 ; Andren et al., 2006). Ces subadultes cherchent à s'installer et devenir résidents. Lors de tels déplacements, les lynx traversent de nouveaux territoires méconnus et largement maillés par de nombreuses routes. Peut-être que ces nouvelles zones sont plus à risques mais il est difficile de dire si un rôle majeur est attribué à la dispersion dans l'accidentologie. Cependant, les cartes de chaleurs réalisées sur différentes périodes suggèrent malgré tout une relation entre collisions et ajouts de nouvelles zones de présence de l'espèce en direction du nord, indifféremment des hot spots.

Influence de l'environnement et pourcentage de type d'habitats autour des hot spots de collision.

Il ressort quelques tendances communes mais aucune configuration typique ou typologie clairement mise en évidence. De nombreuses collisions ont lieu sur des territoires faiblement artificialisés et agricoles, mais l'inverse également, c'est à dire les zones à dominante naturelle et forestière. Dans l'ACM, le rapport de corrélation des variables actives fait ressortir les variables agricoles et forestières fortement liées aux deux dimensions. Parmi les modalités les mieux projetées sur le graphique 5, il en ressort trois groupes. Un premier type de paysage serait faiblement agricole et très forestier ; un second type serait à l'inverse très agricole et faiblement forestier, enfin le troisième type présente entre 50 à 75% de forêts et 25 à 50% de sols agricoles.

En faisant l'exercice théorique de fusionner et superposer les trois derniers graphiques de l'ACM, (Figures 4,5,6), il ressort trois groupes de collisions distincts. Le premier groupe d'individus morts par collision (Figure 4) un peu dense semble avoir lieu sur les routes départementales dans des milieux fortement agricoles, avec peu de forêts, durant la période scolaire et sur des zones de présence régulière du lynx. Le second groupe d'individus morts par collisions, là aussi denses, semble avoir lieu sur les routes nationales, aux habitats alentour peu agricole et très forestier ; elles surviennent durant la saison d'été, lors des périodes de vacance, et à l'opposé en présence occasionnelle de l'espèce. Le troisième groupe représente des données « collisions » plus éparpillées, et liées aux autoroutes dans un environnement également réparti entre terres agricoles et milieux forestiers. De plus d'après les cartes d'habitats et d'altitude (Figure 10 et annexes), les routes à plus forts taux de mortalités semblent se situer sur des continuités écologiques mais également à partir de 500 m d'altitude. Le continuum forestier semble moins important que nous l'avions supposé. Il est probable que la variable mesurée par le calcul des proportions (en%) de la densité de forêts ne renseigne pas la notion de corridors. De plus, les collisions se situent au niveau de changement d'altitude qui laisse à penser que des falaises sont présentes dans le milieu. D'après la littérature, ces résultats ne sont pas

surprenants. Les lynx ont une préférence pour les milieux forestiers de plaine ou de montagne, mais ils utilisent également des milieux plus ouverts comme les prairies. Ces différents habitats leur permettent de se procurer leurs proies de prédilections qui sont le chamois et le chevreuil. Les milieux plus escarpés, accidentés ont plusieurs rôles dans la vie d'un lynx. Ils sont utilisés par les femelles pour la mise bas mais sont également appréciés par tous pour les siestes ou en tant que poste d'observation (Stahl et Vandel, 1998 ; Zimmermann, 2004 ; Raydelet, 2006 ; Vallance, 2007 ; Déom, 2015).

Retour sur la méthodologie

Ces résultats sont à prendre avec la plus grande réserve. La méthode utilisée d'échantillonnage des tronçons comporte un fort biais d'autocorrélation. Dans les tronçons à nombreuses collisions, ces dernières sont distantes parfois de moins de 500 m. Il arrive donc que certains tronçons de 1 km partagent un même linéaire engendrant par là même un biais d'autocorrélation. Il s'agirait probablement dans une prochaine analyse de changer d'échelle et d'utiliser une maille plus élargie en rassemblant plusieurs points de collision. Pour éviter ce biais, nous aurions pu découper des tronçons de 1 km aléatoirement et prendre en compte le nombre de collisions dessus, mais nous n'aurions pu introduire les variables liées aux individus « lynx morts » telles que le sexe dans l'ACM. D'après plusieurs études, le découpage en segment (Gaillard et al., 2012 ; Visintin, 2016, 2017) ou la pixellisation (Gimenez, 2019) permettrait d'éviter cette autocorrélation spatiale. Cependant la pixellisation apporte en plus les variables explicatives autour des collisions.

La perte d'information peut également être due aux choix de l'analyse, c'est à dire l'ACM. La construction des variables qualitatives peut être améliorée, notamment par la subdivision et/ou la fusion des modalités. Il y a aussi dans ce type d'analyse une perte d'information en transformant une donnée quantitative précise en une donnée qualitative moins précise. De plus, il est fort possible que ces regroupements soient parfois très subjectifs. Par exemple ici, la variable « sinuosité » est construite en deux modalités peu sinuose et sinuose. Les classes ont été déterminées subjectivement par rapport à la répartition des données, mais aucune vérification sur le terrain n'a permis d'ajuster le seuil choisi pour passer d'une modalité à l'autre. Il serait intéressant d'effectuer l'analyse mixte de Hills et Smith très proche de l'ACM mais supportant des variables qualitatives et quantitatives permettant d'éviter une perte d'information.

Le jeu de donnée est aussi critiquable pour diverses raisons. Tout d'abord, sur les données de collisions, il est entendu ici qu'il y ait un relevé de point GPS des animaux morts. Cependant, tous les lynx accidentés ne meurent pas instantanément lors de la collision mais peuvent parcourir quelques centaines de mètres parfois avant de mourir. Pour les individus retrouvés hors segment de

route, nous avons choisi de les relier à la route la plus proche. Dans la majorité de ces cas, les routes sont plutôt isolées, il y a donc plus de chance que le lynx se soit fait tuer sur la route à proximité plutôt que sur une route forestière. Mais dans d'autres cas, le point GPS est compris entre plusieurs routes, et le choix s'est fait en mesurant laquelle était la plus proche sans tenir compte de la topographie du secteur, ou bien du trafic.

De plus, l'aspect temporel des données n'a pas été pris en compte dans cette analyse ACM (à l'exception de la Figure 7 qui tente un regroupement par grande période). Effectivement, les données datent pour la plus ancienne de 1982 jusqu'en 2018 sur les analyses spatiales. Or les variables sur les infrastructures et leurs environnements (proportion d'habitats forestiers, agricoles, etc.) ainsi que l'occurrence des lynx, sont ceux des cinq dernières années. A titre d'exemple, nous n'avons pas pu intégrer les changements tels que le passage d'une route à 1 x 2 voies à 2 x 2 voies ou encore l'ajout d'une nouvelle branche d'autoroute voire les aménagements lors de ces travaux qui peuvent être à l'origine de perturbation ou d'une augmentation des collisions, avant l'apprentissage et l'appropriation d'une nouvelle situation par les lynx. Toutes ces informations sont à prendre en compte du point de vue théorique mais malheureusement elles sont très localisées et elles n'existent que dans la mémoire des agents. A ce jour, on ne peut qu'utiliser des variables communes à une grande majorité des infrastructures. De solides bases de données doivent être mises en place à l'avenir tant au niveau des informations qualitatives (travaux sur certains tronçons, etc..) que celles quantitatives (linéaire de clôture, écopassage, etc.).

Les mesures de réductions

En complément de l'analyse multivariée faiblement discriminante, il ressort toutefois de la spatialisation des données de collision (figure 8, carte de chaleur) des secteurs plus accidentogènes que d'autres. Les experts de terrain et les services « route et autoroutier » concernés reconnaissent également le besoin dans ces zones d'une amélioration par des mesures correctrices à court et moyen terme.

En réponse à la problématique des collisions d'animaux sauvages sur les réseaux d'infrastructure, la construction de passage à faune est souvent préconisée. Cette méthode est efficace, lorsqu'elle est associée à un système de clôture, mais onéreuse. Elle est le plus souvent mise en place lors de projets autoroutiers (Terraz, 1991 ; Sétra, 2006 ; Grilo, 2008). Dans le cas d'aménagements anciens routiers, les mesures sont la pose de réflecteurs sur les bords des tronçons de routes accidentogènes de la grande faune (chevreuil, sanglier, etc.). Ces dispositifs reposent sur le principe d'effarouchement des animaux en reflétant les phares des véhicules, mais à ce jour leur efficacité a été peu étudiée. Cependant, quelques études ont été menées. Les résultats restent mitigés, certains prouvent son

efficacité (Terraz, 1991 ; Riginos et al., 2018), tandis que d'autres démontrent qu'après un certain temps les animaux s'habituent et les collisions reprennent à leur niveau antérieur (Polster et al, 2018). La réduction de la vitesse est aussi un facteur sur lequel il est essentiel de travailler (Simon, 2012 ; Garrote et al., 2018), peut-être avec l'aide de panneau « présence de lynx » soutenu par une personnalité, comme expérimenté en Espagne. (Gilles Moyne, 2019, communication personnelle).

Nous suggérons de nouvelles pistes testables à moindre coût et portant sur une cible peu impliquée, celle des automobilistes. L'application mobile waze est un GPS interactif. Il indique les itinéraires, les travaux, les accidents mais également d'autres problèmes liés à la circulation. C'est une aide à la conduite en toute sécurité. Gratuitement, les créateurs de cette application proposent des échanges d'information. Il serait donc possible de demander des données sur la limitation de vitesse à l'échelle de la zone d'étude, mais également, la vitesse réalisée par les internautes, et peut-être le trafic. Ces données actuellement manquantes seraient très utiles à notre problématique. Nous pourrions également informer l'application des tronçons les plus accidentés, préalablement définie avec les gestionnaires, afin qu'une alerte alarme les utilisateurs à l'approche du danger. Ces derniers détiendraient l'information en temps réel que la zone est dangereuse ; ils pourraient adapter leur comportement, réduire leur vitesse et augmenter leur vigilance.

Cependant, des suivis scientifiques rigoureux sur cette problématique de collisions routières avec la faune sauvages / route doivent se poursuivre voire être renforcés, afin d'obtenir des réponses espèce par espèce sur différents types de routes (Grilo, 2015).

Une autre analyse de statistiques inférentielles serait également intéressante à tester avec ce jeu de données. Les données de lynx morts par collisions ne seraient plus étudiées dans une approche centré-individu mais regroupés par tronçons « avec et sans » collisions. Dans cette approche, la construction des variables « habitats » pourrait s'effectuer à une plus grande échelle (maille de 10km). Un modèle linéaire généralisé (GLM) pourrait être réalisé pour comparer et peut-être dégager des typologies de route en discriminant des facteurs explicatifs. Il serait envisageable d'injecter de nouvelles données, notamment les routes forestières dans la variable « type de route » sous réserve de leur géoréférencement, la végétation de bas-côté, le terre-plein central, la présence ou non de clôtures, celle des passages mixte (hydraulique, spécifique à faune) ainsi que le trafic routier, en s'appuyant sur les études démarrées dans ce stage et celles à venir dans le cadre des actions des plans, régionaux et nationaux, sur le lynx. Ces travaux permettraient d'alimenter le modèle de prédiction des risques de collisions utilisés dans le programme ERC-Lynx ainsi que les paramètres de l'aménagement du territoire à faire varier par les utilisateurs. Pour exemple, des partenariats sont déjà en cours avec l'équipe suisse afin de tester le modèle développé dans « ERC Lynx et le tester renforçant ainsi sa robustesse.

Conclusion

Cette étude est une contribution dans une dynamique de projet en cours (le programme ITTECOP ERC-Lynx 2018-2020). Les objectifs de ce stage étaient double, d'une part alimenter, par l'apport de nouvelles variables plus fines, le modèle et outil interactif développé par ERC-Lynx et d'autre part étudier de manière approfondie des cas de collisions sur 2 ou 3 tronçons bien identifiés à dire d'experts. Il s'agissait également de dégager une typologie des routes les plus « accidentogènes » pour le lynx en vue de proposer des principes généraux d'amélioration de ces infrastructures dans les zones favorables au lynx tant actuelles que celles en voient de colonisation potentielle.

Pour le premier objectif, notre contribution n'a pas pu permettre d'alimenter plus finement le modèle ERC-Lynx à cause de données absentes, hétérogènes, des conventions à élaborer pour l'obtention de données, etc... Cette contribution a été essentielle, elle a permis de le discuter lors des PRA (= PLMV), PNA associatif et état et d'inscrire plusieurs actions dans cet objectif d'échange de données et de flux d'information.

Pour le second objectif, il reste encore à approfondir, même s'il résulte quelques tendances communes. Les collisions semblent survenir sur des routes départementales bidirectionnelles fortement agricoles en présence régulière de lynx. Sur de telles infrastructures, parmi les plus nombreuses dans le massif du Jura, la vitesse est limitée à 80/90 km/h et sont davantage rectilignes que sinuose. Cependant ces rapports doivent être ramenés à la disponibilité de ces variables sur l'ensemble de la zone d'étude. Les nationales quant à elles, semblent être entourées le plus souvent de forêts. Comme dans la littérature, il est retrouvé ici également une influence des saisons, dont l'automne est la plus meurrière pour les jeunes. La mortalité routière des lynx est donc influencée par la nature de la route, l'environnement proche, le comportement et la biologie de l'espèce, ainsi que sa présence.

A l'échelle des tronçons à forte collision comme à plus large échelle du massif du Jura, certaines données mériteraient d'être renseignées et collectées sur le terrain ou via les logiciels utilisés dans cette étude. Le travail effectué a permis de mettre en avant cette défaillance au niveau des données discutées durant les réunions du PNA, PNCL et PLMV. Pour permettre de continuer de telles études, les différents groupes de travail ont décidé d'inscrire dans leur action l'acquisition des données liées aux ITT au travers d'une base de données. De plus, par les échanges avec les différents acteurs, ce stage a renforcé et/ou créé des liens de collaboration avec les services routiers et environnement des départements, les FDC et plusieurs espaces naturels (PNR, RNN, ...).

Enfin, de manière plus opérationnelle et à court terme, une fiche descriptive et de préconisation d'actions concrètes sera élaborée d'ici à la fin juillet afin de rendre compte sur des exemples de tronçon accidentogène des perspectives de travail dans le Doubs et le Jura et mesures correctrices à

proposer en vue de réduire la mortalité de lynx par collisions. Une réunion sera également effectuée dans le département de l'Ain afin d'engager une collaboration qui n'a pu être mise en place auparavant.

Référence bibliographique

- ANDREN H., LINNELL JDC., LIBERG O., ANDERSEN R., DANELL A., KARLSSON J., ODDEN J., MOA PF., AHLQVIST P., KVAM T., FRANZEN R., SEGERSTROM P., (2006). Survival rates and causes of mortality in Eurasian lynx (*Lynx lynx*) in multi-use landscapes. *Biological Conservation*, 131, p23-32.
- BASILE M., VAN MOORTER B., HERFINDAL I., MARTIN J., LINNELL JDC., ODDEN J., ANDERSEN R., GAILLARD JM., (2013). Selecting habitat to survive: The impact of road density on survival in a large carnivore.
- BOURGOGNE-FRANCHE-COMTE D. (2018) Le SRCE de Franche-Comté.
[Http://www.bourgogne-franche-comte.developpement-durable.gouv.fr/le-srce-de-franche-comte-a7203.html](http://www.bourgogne-franche-comte.developpement-durable.gouv.fr/le-srce-de-franche-comte-a7203.html) [accessed 3 June 2019].
- BREITENMOSER U., BREITENMOSER-WÜRSTEN C., CAPT S., (1998). Reintroduction and present status of the lynx (*Lynx Lynx*) in Switzerland. *Hystrix, the Italian Journal of Mammalogy*, 10, p17–30.
- BREITENMOSER U., BREITENMOSER-WÜRSTEN C., CARBYN LN., FUNK SM., (2001). Assessment of carnivore reintroduction. In: *Carnivore Conservation*. Edited by J.L. Gittleman, S.M. Funk, D. Macdonald & R.K. Wayne, *Conservation Biology* n°5, Cambridge University Press, p241–281.
- BREITENMOSER U., BREITENMOSER-WÜRSTEN C., OKARMA H., KAPHEGYI T., KAPHYGYI-WALLMANN U., MÜLLER UM., (2000). Action Plan for the conservation of the Eurasian Lynx (*Lynx lynx*) in Europe. *Nature and environment* 112, 68p.
- BREITENMOSER-WÜRSTEN C., ZIMMERMANN F., STAHL P., VANDEL JM., MOLINARI-JOBIN A., MOLINARI P., CAPT S., BREITENMOSER U., (2007). Spatial and social stability of an Eurasian Lynx (*Lynx lynx*) population – a evolution of 10 years of observation in the Jura mountains. *Wildlife Biology* 13, p365-380.
- CEFE-CNRS, ONCFS, CROC, CEREMA (2017) ERC-Lynx. *ERC-LYNX*.
[Https://sites.google.com/view/erclynx/accueil](https://sites.google.com/view/erclynx/accueil) [accessed 30 May 2019].
- CENTRAL INTELLIGENCE AGENCY (CIA), (2013). The world fact book 2013-2014. CIA, Washington, DC. Available from <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/fields/2085.html#xx>.
- CEREMA, (2019). L'expertise publique pour la transition écologique et la cohésion des territoires. *Cerema*. [Http://www.cerema.fr/fr/cerema](http://www.cerema.fr/fr/cerema) [accessed 30 May 2019].
- CHAPRON G., KACZENSKY P., LINNELL JDC., VON ARX M., HUBER D., ANDREN H., LOPEZ-BAO JV., ADAMEC M., ALVARES F., ANDERS O., BALCIAUSKAS L., BALYS V., BEDO P., BEGO F., BLANCO JC., BREITENMOSER U., BROSETH H., BUFKA L., BUNIKYTE R., CIUCCI P., DUTSOV A., ENGLEDER T., FUXJAGER C., GROFF C., HOLMALA K., HOXHA B., ILIOPOULOS Y., IONESCU O., JEREMIC J., JERINA K., KLUTH G., KNAUER F., KOJOLA I., KOS I., KROFEL M., KUBALA J., KUNOVAC S., KUSAK J., KUTAL M., LIBERG O., MAJIC A., MANNIL P., MANZ R., MARBOUTIN E., MARUCCO F., MELOVSKI D., MERSINI K., MERTZANIS Y., MYSLAJEK RW., NOWAK S., ODDEN J., OZOLINS J., PALOMERO G., PAUNOVIC M., PERSSON J., POTOCNIK H., QUENETTE PY., RAUER G., REINHARDT I., RIGG R., RYSER A., SALVATORI V., SKRBINSEK T., STOJANOV A., SWENSON JE., SZEMETHY L., TRAJCE A., TSINGARSKA-SEDEFCHEVA E., VANA M., VEEROJA R., WABAKKEN

- P., WOLFI M., WOLFI S., ZIMMERMANN F., ZLATANOVA D., BOITANI L., (2014). Recovery of large carnivores in Europe's modern human-dominated landscapes.
- CLEVENGER A., CHRUSCZ B., GUNSON K., (2003). Spatial patterns and factors influencing small vertebrate fauna road-kill aggregations.
- CROC, (2014). Bilan des programmes scientifiques et des activités pédagogiques conduits par le CROC du 1er janvier au 31 décembre 2013. Rédaction : Germain E. et Pichenot P., Mai 2014, 114p.
- CROC, (2015). Bilan des programmes scientifiques et des activités pédagogiques conduits par le CROC du 1er janvier au 31 décembre 2014. Rédaction : Germain E., Pichenot P., Papin M. et Clasquin M., Mai 2015, 152p.
- CROC, (2016). Bilan des programmes scientifiques et des activités pédagogiques conduits par le CROC du 1er janvier au 31 décembre 2015. Rédaction : Germain E., Papin M. et Charbonnel A., Mai 2016, 122p.
- CROC, (2017). Bilan des programmes scientifiques et des actions pédagogiques conduits par le CROC du 1er janvier au 31 décembre 2016. Rédaction : Germain E., Charbonnel A. et Papin M., Mai 2017, 68p.
- CROC, (2018). Rapport d'activité 2017. Programmes scientifiques et éducation à l'environnement autour des mammifères carnivores sauvages : le Loup gris, le Lynx boréal et le Chat forestier. Rédaction : Germain E., Charbonnel A. et Papin M., Mai 2018, 121p.
- CROOKS KR, (2002). Relative sensitivities of mammalian carnivores to habitat fragmentation. *Conservation Biology* 16, p488-502.
- DEOM P., (2015). Le lynx boréal. La Hulotte n°102 et 103.
- EUROPEAN UNION ROAD FEDERATION (EFR), (2011). European road statistics hanbook 2011. EFR, Brussels.
- GAILLARD JM., HEMERY A., BONENFANT C., BASILLE M., MARBOUTIN E., MAUZ I., DORE A., (2012). Mise au point d'un modèle de diagnostic des interactions entre structures paysagères, infrastructures de transports terrestres et espèces emblématiques. Le cas du Lynx dans le massif jurassien. Rapport final programme ITTECOP. 82p.
- GARROTE G., FERNANDEZ-LOPEZ J., LOPEZ G., RUIZ G., SIMON MA., (2018). Prediction of Iberian lynx road-mortality in southern Spain: a new approach using the MaxEnt algorithm.
- GIMENEZ O., (2019). Analyses des collisions entre lynx et voitures.
- GITTLEMAN JL., FUNK SM., MACDONALD D., WAYNE RK., (Eds), (2001). Carnivore conservation. Cambridge University Press, Cambridge.
- GRILLO C., BISSONETTE JA., SANTOS-REIS M., (2008). Response of carnivores to existing highway culverts and underpasses: implications for road planning and mitigation.
- GRILLO C., SMITH DJ., KLAR N., (2015). Carnivores: struggling for survival in roaded landscapes. Handbook of road ecology, First edition by van der Ree R., Smith DJ. & Grilo C., p2-312.

KACZNSKY P., CHAPRON G., VON ARX M., HUBER D., ANDREN H., LINNELL J., (2013). Status, management and distribution of large carnivores, bear, lynx, wolf and wolverine in Europe. Part 1 and 2. Report to the EU Commission, 72p.

L'EQUIPE ANIMATRICE DU RESEAU (ONCFS CNERA-PAD), (2014). Bilan national d'évolution de l'aire de présence détectée du Lynx. Une nouvelle méthode plus réactive. Bulletin Lynx du réseau, n°19, p26/27.

LINNELL JDC., BREITENMOSER U., BREITENMOSER-WURSTEN C., ODDEN J., VON ARX M., (2009). Recovery of Eurasian Lynx in Europe: What Part has Reintroduction Played? Reintroduction of Top-Order Predators (ed. by M.W. Hayward and M.J. Somers), pp. 72–91. Wiley-Blackwell, Oxford, UK.

Marboutin E., (2013) Note sur le statut du Lynx dans les Vosges. Bulletin Lynx du Réseau, 18, p14–17.

MEYER I., KANIOVSKI S., SCHEFFRAN J., (2012). Scenarios for regional passenger car fleets and their CO₂ emissions. Energy Policy 41 : p66-74.

MORAND A., (2016). Le lynx : risques routiers et mesures correctrices état des lieux et recommandations. Rapport Cerema pour le compte de la DEB. 90 p.

MORAND A., GERMAIN E., HEMERY A., MARABOUTIN E., CARSIGNOL J., (2016). How to limit Eurasian lynx (*Lynx lynx*) vehicle collisions in a human-dominated landscape in France? Review of habitats fragmentation effects and mitigation measures. Poster réalisé dans le cadre de l'Integrating Transport Infrastructure with Living Landscapes.

OFFICE NATIONAL DE LA CHASSE ET DE LA FAUNE SAUVAGE (2017) Oncfs - Le Réseau Loup - Lynx. [Http://www.oncfs.gouv.fr/Le-Reseau-Loup-Lynx-ru100](http://www.oncfs.gouv.fr/Le-Reseau-Loup-Lynx-ru100) [accessed 26 May 2019].

OFFICE NATIONAL DE LA CHASSE ET DE LA FAUNE SAUVAGE (2019) Répartition Lynx boréal. [Http://carmen.carmencarto.fr/38/Lynx.map#](http://carmen.carmencarto.fr/38/Lynx.map#) [accessed 26 May 2019].

OLIVIER CA., (2018). Etude comparative de différentes méthodes de modélisation de corridors écologiques pour le Lynx boréal en France. Mémoire de stage « Biodiversité et Gestion de l'environnement ». 30p + annexes. Ecole pratique des Hautes Etudes.

POLSTER JU., SCHULZE C., HERZOG S., (2018). Why wildlife-warning reflectors do not work and how they can still be useful. Infra Eco network Europe (EIENE) International Conference, 10. bis 14. September 2018, Abstract Book, 22, Eindhoven 2018.

RAYDELET P., (2006). Le lynx boréal. Editions Delachaux & Niestlé, Lausane, Paris. 191p

RIGINOS C., GRAHAM MW., DAVIS MJ., JOHNSON AB., MAY AB., RYER KJ., HALL LE., (2018). Wildlife warning reflectors and white canvas reduce deer-vehicle collisions and risky road-crossing behavior.

SCHIMDT-POSTHAUS H., BREITENMOSER-WÜRSTEN C., POSTHAUS H., BACCIARINI L., BREITENMOSER U., (2002). Causes of mortality in reintroduced Eurasian Lynx in Switzerland. Journal of Wildlife Diseases, 38, p84-92.

SCHMIDT-POSTHAUS.H, BREITENMOSER.C, BREITENMOSER.U., (2002). Causes of mortality in reintroduced Eurasian lynx in Switzerland.

SETRA (Cete de l'Est)., (2006). Routes et passages à faune. Bilan d'expériences.

SIMON E., (2012). Ten years conversing the Iberian lynx. Consejeria de agricultura y medio ambiente, junta de andalucia, Seville.

SNOW NP., ZHANG Z., FINLEY AO., RUDOLPH BA., PORTE WF., WILLIAMS DM., WINTERSTEIN SR., (2017). Regional-Based Mitigation to Reduce Wildlife–Vehicle Collisions. *The Journal of Wildlife Management*. 10p.

STAHL P., VANDEL JM., (1998). Le lynx boréal *Lynx lynx* (Linné, 1758). Encyclopédie des carnivores de France., n°19. Société française d'étude et de protection des mammifères. Ed. Paris, 65p.

STAHL P., VANDEL JM., (1999). Mortalité et captures de lynx (*Lynx lynx*) en France (1974-1998). *Mammalia*, 63, p49-59.

STIFTUNG NATUR UND UMWELT RHEINLAND-PFALZ, (2015). Wiederansiedlung von Luchses (*Lynx lynx carpathicus*) im Biosphärenreservat Pfälzerwald. EU LIFE+ Natur-Projekt der Stiftung Natur und Umwelt Rheinland-Pfalz, 4p.

TERRAZ L., (1991). Un P.A.S. dans la Malnoue. Un passage pour animaux sauvages sous l'autoroute A39 dans la forêt de Champvans. (Jura,39). Rapport technique. 57p + annexes.

TROMBULAK S., FRISSELL C., (2000). Revisión de los Efectos de Carreteras en Comunidades Terrestres y Acuáticas. Review of Ecological Effects of Roads on Terrestrial and Aquatic Communities, 14, p18-30.

IUCN FRANCE, MNHN, SFEPM, ONCFS, (2009). La liste rouge des espèces menacées en France – Chapitre Mammifères de France métropolitaine. Paris, France.

VACANCES-SCOLAIRES.EDUCATION (UNDATED) Vacances scolaires 2018 - Calendrier officiel 2017-2018 en France. [Https://vacances-scolaires.education/annee-2017-2018.php](https://vacances-scolaires.education/annee-2017-2018.php) [accessed 26 May 2019].

VALLANCE M., (2007). Faune sauvage de France : biologie, habitats et gestion. Edition Du gerfaut, 415p.

VANDEL JM., (2001). Répartition du Lynx (*Lynx lynx*) en France (Massif alpin, jurassien et vosgien). Méthodologie d'étude et statut actuel. Mémoire de l'Ecole Pratique des Hautes Etudes. 112p.

VERYUTILE (undated) Calendrier - Very-utile. [Http://www.very-utile.com/calendrier-2018-premier-semestre.php](http://www.very-utile.com/calendrier-2018-premier-semestre.php) [accessed 26 May 2019].

VISINTIN C., REER R., MCCARTHY MA., (2016). A simple framework for a complex problem? Predicting wildlife-vehicle collisions. *Ecology and evolution*, 6, p6409-6421.

VISINTIN C., REER R., MCCARTHY MA., (2017). Consistent patterns of vehicle collision risk for six mammal species. *Journal of environmental management*, 201, p397-406.

VON ARX M., BREITENMOSER-WÜRSTEN C., ZIMMERMANN F., BREITENMOSER U., (2004). Status and conservation of the Eurasian Lynx (*Lynx lynx*) in Europe in 2001. KORA Bericht No. p19.

WORLD ENERGY COUNCIL (WEC)., (2011). Global transport scenarios 2050. WEC, London.

ZIMMERMANN F., (1998). Dispersion et survie des Lynx (*Lynx lynx*) subadultes d'une population réintroduite dans la chaîne du Jura. Thèse. 50p. Université de Lausane.

ZIMMERMANN F., (2004). Conservation of the Eurasian lynx (*Lynx lynx*) in a fragmented landscape – habitat models, dispersal and potential distribution. Thèse de doctorat sciences de la vie (PhD), Université de Lausanne. 179 p.

Annexes

Annexe 1 : Présentation du projet ERC-Lynx, colloque programme ITTECOP les 5,6,7 juin 2019



ERC-LYNX

Éviter, réduire et compenser la mortalité du Lynx par collision avec les véhicules de transport

Présentation du projet

Les infrastructures de transport terrestre et leurs emprises (ITTe), qu'elles soient routières ou ferroviaires, font courir des risques pour le Lynx boréal, l'un des derniers grands carnivores européens présent en France. Les ITTe contribuent en effet à détruire et morceler les habitats favorables au lynx et constituent un frein à leur dispersion, un processus indispensable au maintien des populations en bon état de conservation. D'autre part, les collisions avec les véhicules représentent l'une des principales causes de mortalité.

Dans ce contexte, le groupement composé du Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Évolutive (CEFE), du Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (CEREMA), du Centre de Recherche et d'Observation sur les Carnivores (CROC) et de l'Office National de la Chasse et de la Faune Sauvage (ONCFS) conduit un projet de recherche appliquée intitulé « Éviter, réduire et compenser le risque de mortalité du Lynx par collision avec les véhicules de transport / ERC-Lynx ». Ce projet a pour objectif de développer un outil prédictif opérationnel à destination des gestionnaires d'infrastructures de transport terrestre en couplant risque

de collision, viabilité des populations de Lynx et enjeux des territoires.

Le projet ERC-Lynx vise notamment à renforcer la mise en œuvre de politiques publiques d'aménagement du territoire telle que la TVB et ses déclinaisons régionales (SRCE/SRADDET). Une originalité du projet réside dans la co-construction de l'outil prédictif. En effet, son développement et son exploitation ne peuvent aboutir sans l'implication à toutes les étapes des acteurs publics et privés, et en particulier les chercheurs, les gestionnaires d'espaces naturels et les spécialistes des mammifères carnivores, les gestionnaires d'infrastructures et les spécialistes en charge de l'ingénierie des routes, de la planification des transports, etc. Aussi, le projet s'organise autour de plusieurs ateliers pour co-construire et valider cet outil prédictif sur un site pilote localisé dans le Jura.

Ce projet est une réelle opportunité pour l'ensemble des acteurs du Lynx en France, mais aussi à l'international, de se rapprocher et de collaborer plus étroitement avec les opérateurs des ITTe dans un objectif commun : réduire la mortalité du Lynx par collision.

CONTACT

Olivier Gimenez
olivier.gimenez@cefe.cnrs.fr
Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Évolutive (CEFE)

PARTENAIRES

Centre de Recherche et d'Observation sur les Carnivores (CROC)
Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (CEREMA)
Office National de la Chasse et de la Faune Sauvage (ONCFS)

FINANCEMENTS

ITTECOP (CILB-MTES-ADEME)

CALENDRIER

Date de début : 1^{er} janvier 2018
Date de fin : 30 juin 2020

POUR ALLER PLUS LOIN
[www.sites.google.com/view/erclynx/](http://sites.google.com/view/erclynx/)

Apports et résultats

Le principal apport du projet est le développement et la mise à disposition des acteurs d'un logiciel pour évaluer l'impact (positif ou négatif) de la mise en place d'un aménagement des ITTe ou du paysage sur la viabilité du lynx. Cet outil sera distribué librement avant la fin du projet et deux articles seront rédigés, l'un pour valoriser l'outil, l'autre sur la démarche de co-construction avec les acteurs.

Pour construire cet outil, nous avons effectué un effort conséquent de mise à jour des connaissances sur l'espèce concernant les densités d'individus (article soumis), la distribution et l'habitat favorable (article en préparation), la connectivité (stage M2), les risques de collision (article en préparation) et la démographie. En parallèle, un effort a été fait sur la mobilisation et la collecte des données concernant les infrastructures routières (stage M2).

Préconisations pour l'action

Nous organisons un atelier au mois de juin 2019 et un séminaire final au cours desquels les préconisations pour l'action seront discutées.

Perspectives

La fin du projet est prévue pour juin 2020, il nous reste encore un peu plus d'un an pour discuter des perspectives, y compris avec les acteurs. A ce stade, la principale perspective envisagée est un travail sur la pérennité de l'outil développé, entre autres via l'organisation de formations auprès des acteurs (en cours de réflexion) ainsi qu'une mise à jour de l'outil suite aux retours des acteurs.

Annexe 2 : Tableau des variables utilisées

Variables	Modalités
Age	Jeune Adulte
Sexe	Mâle Femelle
Jours	Lundi Mardi Mercredi Jeudi Vendredi Samedi Dimanche
Semaine	Semaine (Du lundi au vendredi) Week-end (Du samedi au dimanche)
Mois	Janvier Février Mars Avril Mai Juin Juillet Août Septembre Octobre Novembre Décembre
Saison	Hiver (Janvier à Mars) Printemps (Avril à Juin) Été (Juillet à Septembre) Automne (Octobre à Décembre)
Période scolaire (PS)	Vacance Ecole
Limitation de vitesse (Lim.V)	30 à 70 80 à 90 110 à 130
Type de route (Typ.R)	Autoroute Nationale Départementale Route communale
Nombre de voies	2 Supérieure à 2
Sinuosité	Peu sinueux < 5 Sinueux > 5
Occurrence	Régulier Occasionnelle Absence
Territoire artificiel	PeuAr < 7 MoyenAr de 7 à 14 AssezAr de 14 à 21 Articiel > 21
Territoire agricole	PeuAgr de 0 à 25 % MoyenAgr de 25 à 50 % Agricole de 50 à 75 % TrèsAgr de 75 à 100 %
Forêts et Milieux semi-naturels	PeuF de 0 à 25 % MoyenF de 25 à 50 % Forestier de 50 à 75 % TresF de 75 à 100 %
Zone humide	Absence = 0 Présence > 0
Surface en eau	Absence = 0 Présence > 0

Annexes 3 : Graphiques des tests univariés réalisés sur l'ensemble des variables

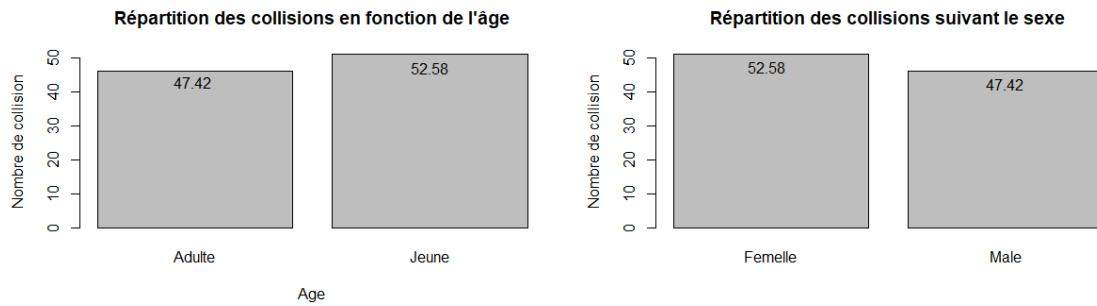


Figure 11: Diagrammes en bâton réalisés sous RStudio pour les variables Age et Sexe. Le jeu de données est composé de ($n=51$) 52.58 % de Jeunes et pareillement pour les Femelles ($n=51$, contre 47.42% ($n=46$) d'Adultes et de Mâles ($n=46$).

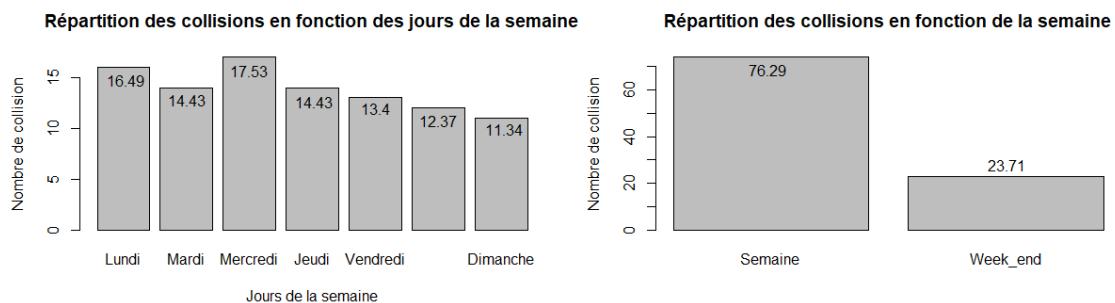


Figure 12 : Diagrammes en bâton réalisés sous RStudio pour les variables Jours et Semaine. Les deux graphes montrent une tendance moins importante pour le week-end soit samedi et dimanche.

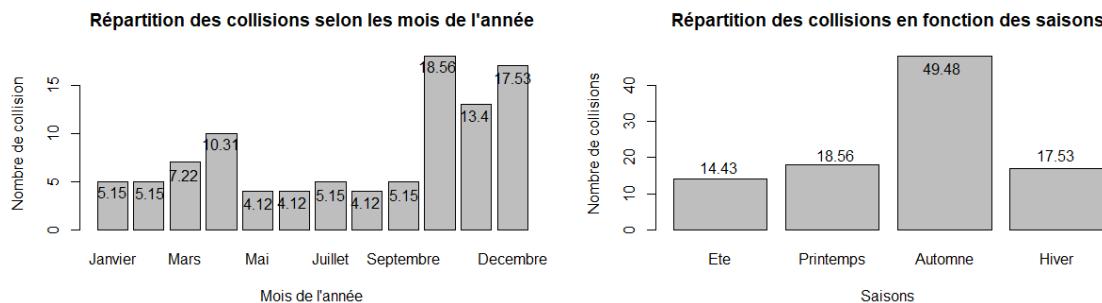


Figure 13 : Diagrammes en bâton des variables Mois et Saisons, réalisés sous le logiciel RStudio. Les mois de fin d'années semblent être les plus accidentés comme pour l'automne.

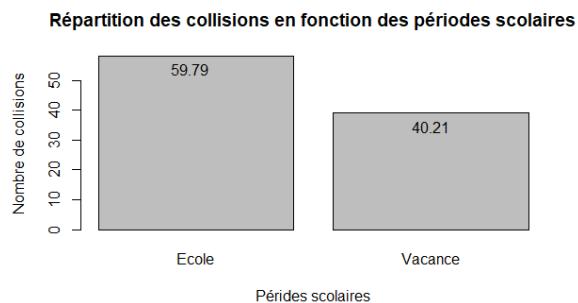


Figure 14 : Diagramme en bâton sur la variable PS (période scolaire) réalisé sous le logiciel RStudio.

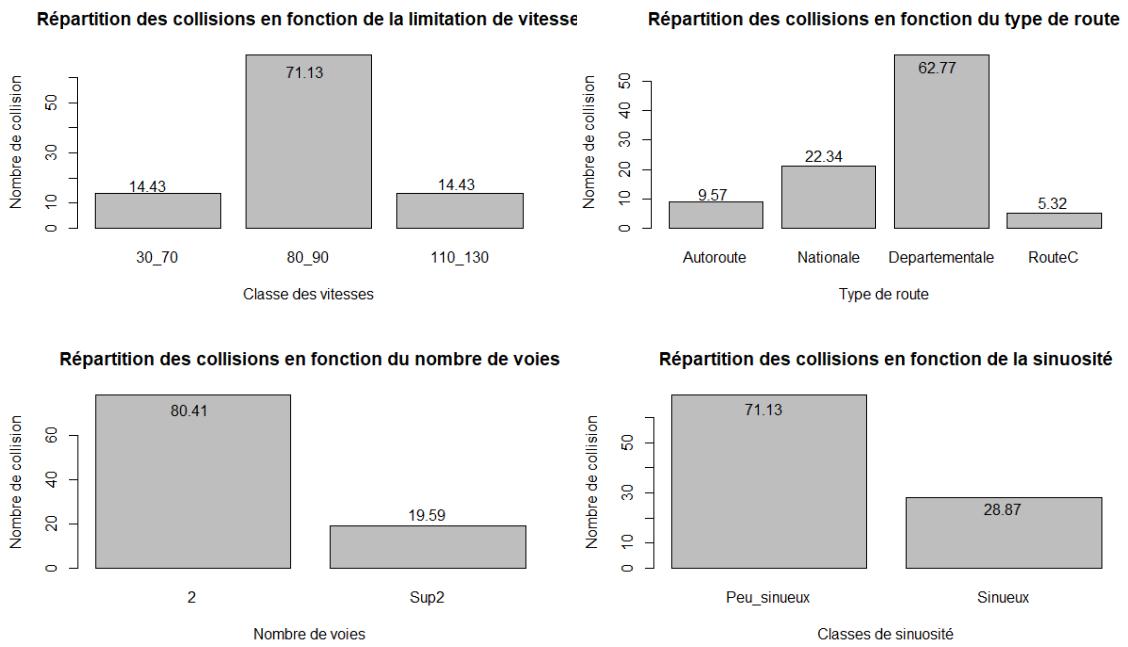


Figure 15 : Diagrammes en bâton réalisés sous RStudio sur les variables Limitation de vitesse, Type de route, Nombre de voies et Sinuosité. Les 4 graphes montrent des répartitions hétérogènes des données.

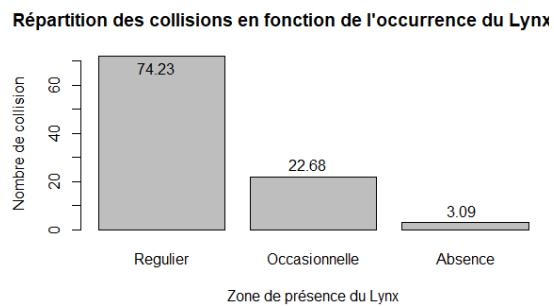
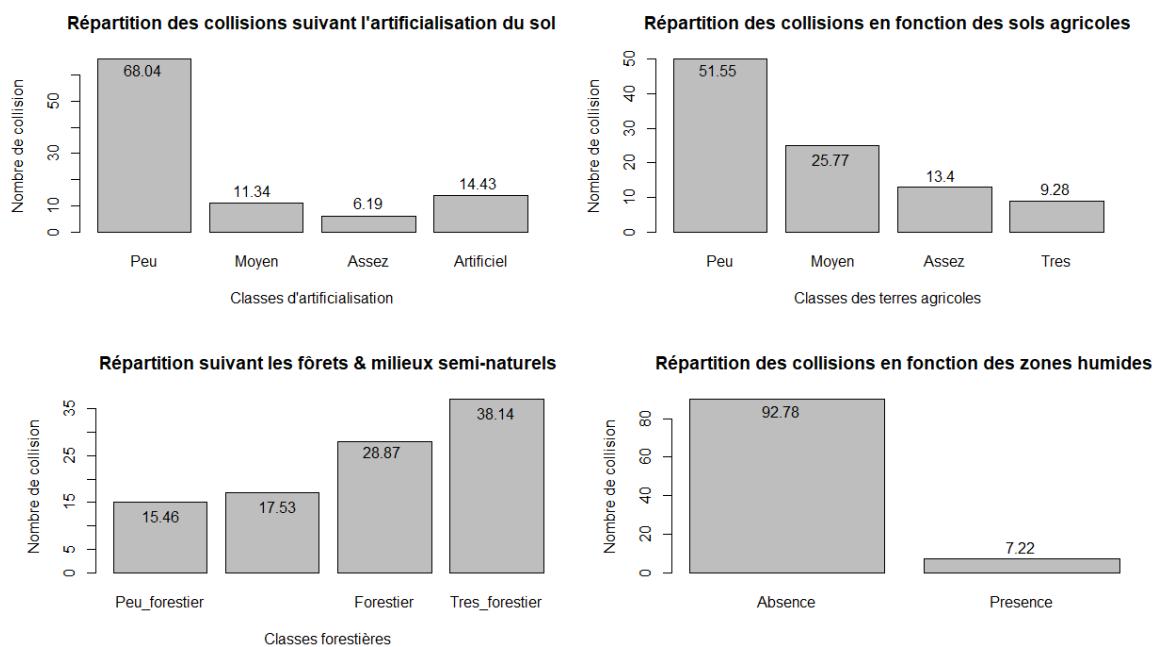


Figure 16 : Diagramme en bâton de la variable occurrence réalisé sous RStudio. Répartition très hétérogène des données suivant les classes de présence du Lynx.



Répartition des collisions en fonction de la surface en eau

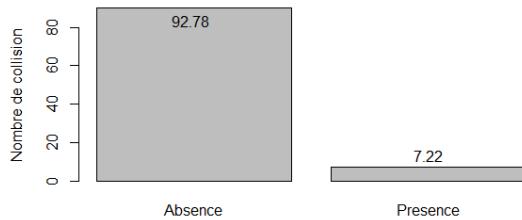


Figure 17 : Diagrammes en bâton réalisés sous RStudio des variables habitats, soit territoire artificialisé, territoire agricole, forêts et milieux semi-naturels, zones humides et surface en eau. En référence aux 5 grands habitats de Corine Land Cover.

Annexe 4 : Tableau résumé de l'ACM

Call:													
MCA(X = acm2, ncp = 5, quali.sup = c(1:4))													

Eigenvalues	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5	Dim.6	Dim.7	Dim.8	Dim.9	Dim.10	Dim.11	Dim.12	Dim.13
Variance	0.347	0.313	0.255	0.214	0.190	0.167	0.161	0.134	0.129	0.100	0.093	0.048	0.016
% of var.	15.998	14.466	11.749	9.886	8.773	7.706	7.439	6.178	5.951	4.630	4.295	2.199	0.732
Cumulative % of var.	15.998	30.464	42.213	52.099	60.871	68.577	76.017	82.195	88.146	92.775	97.070	99.268	100.000

Individuals	Dim.1	ctr	cos2	Dim.2	ctr	cos2	Dim.3	ctr	cos2	Dim.4	ctr	cos2	Dim.5	ctr	cos2
1	1.028	3.141	0.346	-0.403	0.535	0.053	0.953	3.680	0.298	-0.180	0.156	0.011	0.495	1.330	0.080
2	-1.037	3.197	0.600	0.277	0.253	0.043	0.137	0.076	0.011	0.341	0.559	0.065	-0.290	0.457	0.047
3	0.643	1.228	0.152	1.139	4.270	0.477	-0.269	0.294	0.027	0.273	0.358	0.027	-0.267	0.388	0.026
4	-0.860	2.198	0.368	0.014	0.001	0.000	0.300	0.363	0.045	-0.778	2.912	0.302	-0.062	0.021	0.002
5	0.846	2.129	0.216	0.399	0.524	0.048	0.409	0.678	0.051	0.482	1.120	0.070	-0.232	0.291	0.016
6	0.637	1.207	0.239	0.784	2.023	0.362	-0.340	0.468	0.068	-0.229	0.252	0.031	0.098	0.052	0.006
7	0.637	1.207	0.239	0.784	2.023	0.362	-0.340	0.468	0.068	-0.229	0.252	0.031	0.098	0.052	0.006
8	0.102	0.031	0.005	-0.914	2.747	0.378	0.163	0.107	0.012	0.488	1.147	0.108	0.366	0.725	0.061
9	0.672	1.345	0.222	0.538	0.954	0.142	-0.059	0.014	0.002	-0.442	0.940	0.096	-0.027	0.004	0.000
10	0.148	0.065	0.005	1.140	4.274	0.312	-0.455	0.838	0.050	-0.388	0.723	0.036	0.377	0.770	0.034
11	-1.156	3.978	0.245	0.668	1.468	0.082	0.196	0.155	0.007	0.773	2.878	0.110	0.747	3.029	0.102
12	-1.037	3.197	0.600	0.277	0.253	0.043	0.137	0.076	0.011	0.341	0.559	0.065	-0.290	0.457	0.047
13	0.513	0.783	0.132	-0.846	2.356	0.358	0.055	0.012	0.002	-0.208	0.208	0.022	0.517	1.452	0.134
14	0.992	2.928	0.364	-0.157	0.082	0.009	0.672	1.829	0.167	0.033	0.005	0.000	0.620	2.085	0.142
15	-0.085	0.022	0.005	-0.466	0.716	0.151	-0.452	0.827	0.141	0.649	2.025	0.291	0.005	0.000	0.000
16	-0.064	0.012	0.006	-0.450	0.667	0.275	-0.592	1.420	0.475	0.005	0.000	0.000	-0.299	0.485	0.121
17	0.247	0.181	0.051	0.733	1.767	0.447	-0.373	0.564	0.116	-0.176	0.150	0.026	-0.357	0.692	0.106
18	-0.163	0.079	0.007	-0.043	0.006	0.001	-0.674	1.840	0.123	-0.206	0.205	0.012	0.435	1.026	0.051
19	0.450	0.603	0.113	-0.007	0.000	0.000	0.306	0.378	0.052	0.033	0.005	0.001	-0.321	0.560	0.058
20	0.789	1.850	0.293	0.583	1.116	0.160	-0.007	0.000	0.000	-0.176	0.150	0.015	0.584	1.851	0.161
21	-0.064	0.012	0.006	-0.450	0.667	0.275	-0.592	1.420	0.475	0.005	0.000	0.000	-0.299	0.485	0.121
22	-0.029	0.003	0.001	-0.696	1.593	0.448	-0.311	0.392	0.089	-0.208	0.209	0.040	-0.424	0.974	0.166
23	-1.057	3.326	0.448	0.261	0.224	0.027	0.278	0.312	0.031	0.984	4.665	0.388	0.013	0.001	0.000
24	-0.064	0.012	0.006	-0.450	0.667	0.275	-0.592	1.420	0.475	0.005	0.000	0.000	-0.299	0.485	0.121
25	-0.177	0.093	0.012	-0.459	0.693	0.080	0.862	3.010	0.282	0.187	0.168	0.013	-0.485	1.278	0.090
26	-0.416	0.514	0.102	0.527	0.912	0.163	-0.098	0.039	0.006	0.190	0.175	0.021	-0.396	0.852	0.092
27	0.361	0.388	0.083	-0.645	1.367	0.264	-0.278	0.313	0.049	-0.261	0.327	0.043	0.032	0.005	0.001
28	0.081	0.020	0.003	-0.433	0.616	0.073	0.795	2.562	0.245	-0.453	0.987	0.079	0.478	1.240	0.088
29	0.247	0.181	0.051	0.733	1.767	0.447	-0.373	0.564	0.116	-0.176	0.150	0.026	-0.357	0.692	0.106
30	0.219	0.142	0.029	-0.590	1.144	0.211	0.053	0.011	0.002	0.028	0.004	0.000	-0.278	0.419	0.047
31	-0.860	2.198	0.368	0.014	0.001	0.000	0.300	0.363	0.045	-0.778	2.912	0.302	-0.062	0.021	0.002
32	0.326	0.316	0.086	-0.399	0.524	0.129	-0.559	1.266	0.253	-0.048	0.011	0.002	0.156	0.133	0.020
33	-1.037	3.197	0.600	0.277	0.253	0.043	0.137	0.076	0.011	0.341	0.559	0.065	-0.290	0.457	0.047
34	-0.029	0.003	0.001	-0.696	1.593	0.448	-0.311	0.392	0.089	-0.208	0.209	0.040	-0.424	0.974	0.166
35	-0.035	0.004	0.000	-0.477	0.748	0.091	0.743	2.237	0.220	-0.718	2.485	0.206	-0.133	0.095	0.007
36	-0.064	0.012	0.006	-0.450	0.667	0.275	-0.592	1.420	0.475	0.005	0.000	0.000	-0.299	0.485	0.121
37	-1.001	2.983	0.470	0.032	0.003	0.000	0.419	0.709	0.082	0.128	0.078	0.008	-0.415	0.935	0.081
38	-0.994	2.939	0.214	0.667	1.461	0.096	-0.064	0.016	0.001	-0.776	2.898	0.130	0.796	3.440	0.137
39	0.920	2.518	0.123	0.079	0.021	0.001	1.324	7.098	0.254	-0.024	0.003	0.000	-1.296	9.113	0.243
40	-0.064	0.012	0.006	-0.450	0.667	0.275	-0.592	1.420	0.475	0.005	0.000	0.000	-0.299	0.485	0.121
41	-0.064	0.012	0.006	-0.450	0.667	0.275	-0.592	1.420	0.475	0.005	0.000	0.000	-0.299	0.485	0.121
42	-0.259	0.200	0.026	0.247	0.200	0.023	0.205	0.170	0.016	-0.284	0.389	0.031	0.135	0.099	0.007
43	-0.029	0.003	0.001	-0.696	1.593	0.448	-0.311	0.392	0.089	-0.208	0.209	0.040	-0.424	0.974	0.166
44	-0.885	2.330	0.354	0.076	0.019	0.003	0.471	0.898	0.100	0.393	0.745	0.070	0.196	0.207	0.017
45	0.794	1.877	0.201	0.938	2.892	0.279	0.064	0.017	0.001	0.325	0.510	0.034	0.218	0.259	0.015
46	-0.743	1.643	0.265	0.058	0.011	0.002	0.352	0.501	0.059	-0.512	1.263	0.126	0.548	1.631	0.144
47	-0.870	2.252	0.232	-0.186	0.114	0.011	0.892	3.224	0.244	0.824	3.269	0.208	0.374	0.760	0.043

Categories																					
	Dim.1	ctr	cos2	v.test	Dim.2	ctr	cos2	v.test	Dim.3	ctr	cos2	v.test	Dim.4	ctr	cos2	v.test	Dim.5	ctr	cos2	v.test	
Autoroute	0.937	3.919	0.090	2.937	1.122	6.206	0.129	3.514	0.181	0.198	0.003	0.566	1.198	10.369	0.147	3.755	-0.065	0.034	0.000	-0.204	
Chemin	1.199	2.136	0.046	2.098	0.047	0.004	0.000	0.082	2.949	17.614	0.278	5.162	-0.207	0.103	0.001	-0.362	-2.850	22.026	0.259	-4.988	
Departemt	-0.462	6.231	0.331	-5.635	-0.243	1.915	0.092	-2.971	-0.133	0.708	0.028	-1.628	-0.049	0.114	0.004	-0.599	-0.300	4.794	0.140	-3.660	
Nationale	0.917	8.755	0.232	4.723	-0.071	0.058	0.001	-0.367	-0.033	0.016	0.000	-0.172	-0.195	0.641	0.011	-1.004	0.892	15.091	0.220	4.592	
RouteC	-0.811	1.630	0.036	-1.853	1.124	3.461	0.069	2.567	-0.381	0.491	0.008	-0.871	-0.635	1.619	0.022	-1.451	1.620	11.863	0.143	3.701	
PeuS	-0.036	0.045	0.003	-0.556	0.238	2.148	0.140	3.665	-0.246	2.811	0.149	-3.779	0.171	1.613	0.072	2.626	0.094	0.554	0.022	1.450	
Sinueux	0.089	0.110	0.003	0.556	-0.587	5.293	0.140	-3.665	0.605	6.928	0.149	3.779	-0.421	3.975	0.072	-2.626	-0.232	1.366	0.022	-1.450	
Occasionnel	0.398	1.964	0.055	2.298	-0.503	3.465	0.088	-2.903	0.749	le 9.472	0.195	4.326	0.109	0.236	0.004	0.627	0.943	20.113	0.309	5.447	
Regulier	-0.138	0.682	0.055	-2.298	0.175	1.203	0.088	2.903	-0.260	3.289	0.195	-4.326	-0.038	0.082	0.004	-0.627	-0.328	6.984	0.309	-5.447	
Artificiel	0.868	5.233	0.127	3.494	-0.391	1.176	0.026	-1.575	1.597	24.098	0.430	6.426	-0.259	0.751	0.011	-1.040	-0.092	0.107	0.001	-0.371	
MoyenAr	-0.205	0.352	0.009	-0.924	0.023	0.005	0.000	0.102	0.068	0.054	0.001	0.309	1.465	29.273	0.456	6.617	0.647	6.437	0.089	2.923	
PeuAr	-0.132	0.566	0.037	-1.880	0.077	0.216	0.013	1.104	-0.356	5.657	0.270	-5.095	-0.323	5.508	0.221	-4.611	-0.147	1.292	0.046	-2.104	
MoyenAg	0.642	5.115	0.143	3.709	1.230	20.725	0.525	7.100	-0.214	0.770	0.016	-1.233	-0.362	2.622	0.045	-2.088	-0.083	0.155	0.002	-0.478	
PeuAg	0.361	3.234	0.139	3.650	-0.788	16.999	0.660	-7.959	-0.112	0.426	0.013	-1.135	0.156	0.981	0.026	1.580	-0.044	0.088	0.002	-0.447	
TresAg	-1.551	26.233	0.706	-8.230	0.392	1.857	0.045	2.082	0.498	3.682	0.073	2.642	0.056	0.054	0.001	0.295	0.195	0.753	0.011	1.032	
Forestier	0.996	13.778	0.403	6.219	0.986	14.915	0.394	6.153	0.080	0.120	0.003	0.498	0.110	0.273	0.005	0.688	-0.171	0.742	0.012	-1.068	
MoyenF	-0.844	5.998	0.151	-3.811	0.233	0.505	0.012	1.051	0.553	3.512	0.065	2.499	-1.385	26.178	0.408	-6.258	0.649	6.474	0.090	2.932	
PeuF	-1.344	13.434	0.330	-5.633	0.293	0.704	0.016	1.226	0.913	8.446	0.153	3.827	1.129	15.337	0.233	4.731	-0.274	1.017	0.014	-1.147	
TresF	0.179	0.585	0.020	1.374	-0.972	19.144	0.582	-7.475	-0.685	11.712	0.289	-5.269	0.096	0.271	0.006	0.735	-0.058	0.111	0.002	-0.444	

Categorical variables (eta2)					
	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5
Typ.R	0.472	0.219	0.291	0.165	0.614
Si	0.003	0.140	0.149	0.072	0.022
occurrence	0.055	0.088	0.195	0.004	0.309
Ter.Art	0.128	0.026	0.455	0.457	0.089
Ter.Agr	0.719	0.744	0.074	0.047	0.011
Fo.Msn	0.703	0.663	0.363	0.541	0.095

Supplementary categories																					
	Dim.1	cos2	v.test	Dim.2	cos2	v.test	Dim.3	cos2	v.test	Dim.4	cos2	v.test	Dim.5	cos2	v.test						
Femelle	-0.107	0.013	-1.101	0.001	0.000	0.011	0.016	0.000	0.168	-0.084	0.008	-0.866	-0.111	0.014	-1.150						
Male	0.118	0.013	1.101	-0.001	0.000	-0.011	-0.018	0.000	-0.168	0.093	0.008	0.866	0.124	0.014	1.150						
Semaine	-0.048	0.007	-0.844	-0.064	0.013	-1.119	-0.018	0.001	-0.319	0.022	0.002	0.380	-0.026	0.002	-0.454						
Weekend	0.155	0.007	0.844	0.205	0.013	1.119	0.058	0.001	0.319	-0.070	0.002	-0.380	0.083	0.002	0.454						
Automne	-0.187	0.034	-1.811	0.124	0.015	1.202	0.103	0.010	1.000	-0.214	0.045	-2.072	0.046	0.002	0.449						
Ete	0.503	0.043	2.025	-0.490	0.041	-1.974	0.063	0.001	0.254	-0.215	0.008	-0.867	-0.068	0.001	-0.273						
Hiver	0.140	0.004	0.634	0.172	0.006	0.775	-0.309	0.020	-1.395	0.596	0.075	2.690	-0.224	0.011	-1.013						
Printemps	-0.026	0.000	-0.121	-0.111	0.003	-0.520	-0.032	0.000	-0.152	0.175	0.007	0.818	0.141	0.005	0.660						
Ecole	-0.249	0.093	-2.981	0.088	0.011	1.047	0.128	0.024	1.525	-0.074	0.008	-0.888	0.134	0.027	1.605						
Vacance	0.371	0.093	2.981	-0.130	0.011	-1.047	-0.190	0.024	-1.525	0.110	0.008	0.888	-0.200	0.027	-1.605						

Supplementary categorical variables (eta2)					
	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5
Sexe	0.013	0.000	0.000	0.008	0.014
Semaine	0.007	0.013	0.001	0.002	0.002
Saison	0.057	0.050	0.023	0.097	0.014
PS	0.093	0.011	0.024	0.008	0.027

Annexe 5 : Cartographies zoomées sur les hot spots

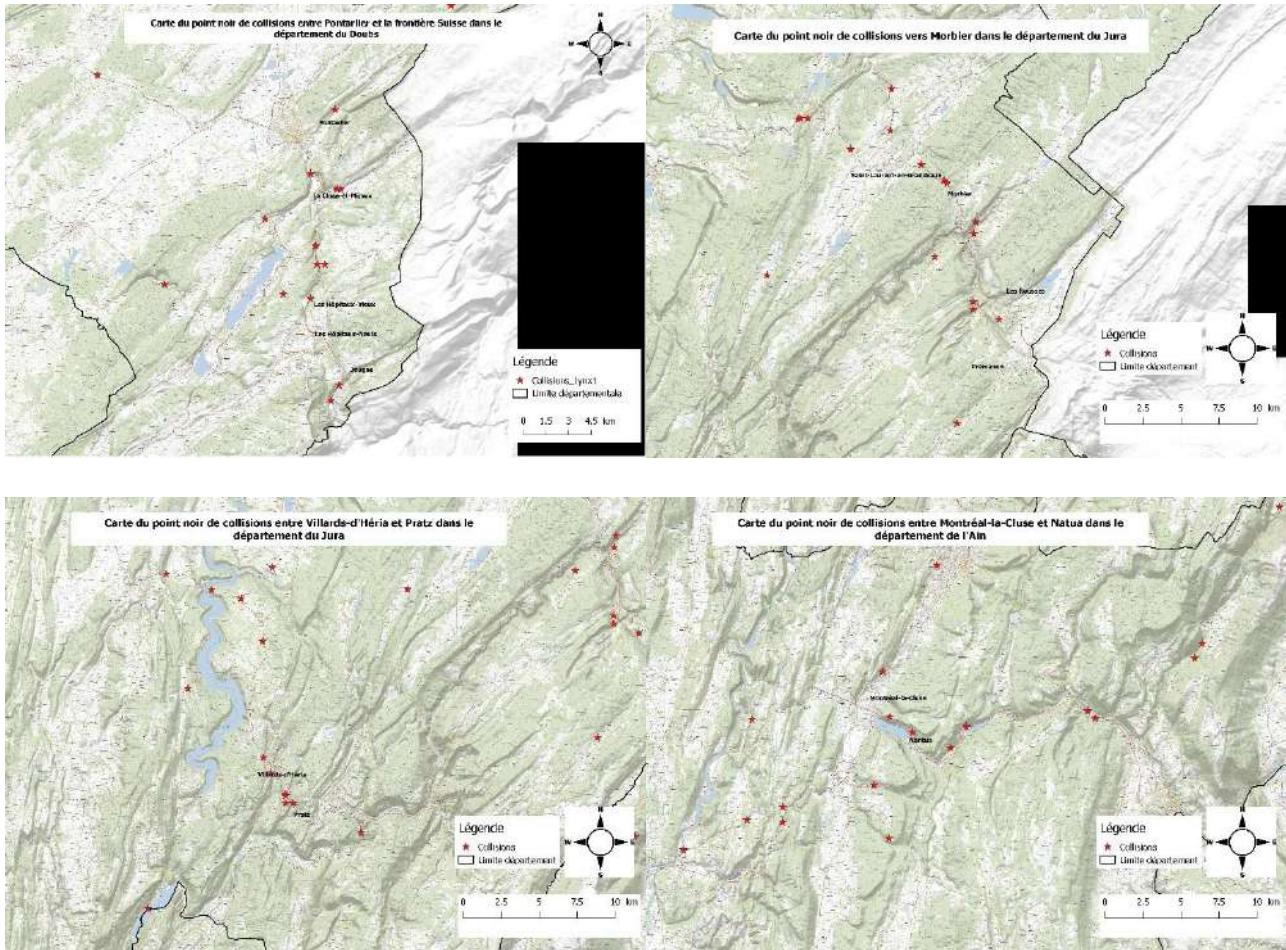


Figure 18: Cartographies des zones les plus accidentogènes sur scan 25 de la France, avec en vert les forêts.

Annexe 6 : Photos des secteurs à collisions dans le Doubs



Photo 1 : (a) Prise de la voiture de la départementale D67B à la sortie de la commune La Cluse et Mijoux en direction de Neuchatel. Secteur comportant 2 collisions routières. (b) Prise de vue du paysage à droite de la photo précédente, présence d'une voie de chemin de fer ainsi que de prairies et d'une forêt.



Photo 2 : (a) Prise de vue en voiture de la route nationale N57 à l'entrée de La Cluse e Mijoux en direction de Pontarlier. La route se change en couloir au pied de la falaise sous le château. (b) Photo d'un chamois, proie du lynx, présent dans les champs après la falaise en direction du Nord.



Photo 3 : (a) Prise de vue de la voiture sur la RN 57 entre La Cluse et Mijoux et Jougne, en direction de la frontière Suisse. Secteur à 4 collisions. Présence de forêt de part et d'autre, d'un muré à droite et d'un chemin forestier à gauche. (b) Prise de vu de la voiture de la même route en direction du Nord. Présence d'une voie ferrée à gauche, d'un sentier forestier en face et d'un panneau attention faune sauvage à droite.



Photo 4 : (a) Prise de vue de la voiture sur la RN57 entre la frontière Suisse et Jougne en direction du Nord. Secteur comportant 2 collisions. Présence d'une falaise grillagée à gauche et d'un sentier forestier à droite.

Résumé

En France, le Lynx boréal *Lynx lynx* fait partie des espèces classées en danger sur la liste rouge nationale. Dans les paysages anthropisés, une des causes de mortalité majeure est liée aux collisions routières. Le projet ITTECOP ERC-Lynx s'est saisi de cette problématique, en croisant le risque de collision et l'aménagement du territoire dans l'objectif d'éviter et réduire cette mortalité. Dans cet objectif, mon stage a porté sur l'étude des routes les plus accidentogènes et les caractéristiques potentielles à leur origine. Au travers de cette étude nous avons donc cherché à décrire des typologies de routes à l'aide de statistiques descriptives ainsi que quelques cartographies. L'ACM réalisée fait ressortir 3 groupes différents de cas de mortalité plus ou moins dense selon la nature et caractéristiques des routes. Ces dernières ne sont pas la seule cause probable des collisions, l'environnement immédiat ainsi que des facteurs biologiques et comportementaux ont également une influence. Nous avons suggéré auprès des acteurs concernés, en vue de renforcer l'outil ERC-Lynx et sa puissance prédictive, la recherche de nouvelles données sur les ITTs et initié leur collecte sans qu'elles puissent être utilisées à cette étape car trop hétérogène sur l'aire d'étude. Nos premiers résultats ont déjà apporté également une prise de conscience de la part de gestionnaires de routes et de l'aménagement du territoire. Il est possible d'agir en intégrant cette espèce vulnérable et emblématique trop souvent ignorée à cause, notamment de son large domaine vital. De plus, une perspective de collaboration avec la Suisse et l'Allemagne sera un atout afin d'agir à l'échelle européenne sur les causes influençant l'accidentologie et aboutir sur des préconisations communes.

- Lynx • Collisions • Typologie routière • Mesures correctrices • Ecologie routière •

Abstract

In France, the Eurasian lynx *Lynx lynx* is one of the endangered species on the national red list. In anthropogenic landscapes, one of the major causes of death is related to road collisions. The ITTECOP ERC-Lynx project has tackled this problem, crossing the risk of collision and spatial planning with the aim of avoiding and reducing this mortality. To this end, my internship focused on the study of the most rugged roads and their potential characteristics. Through this study we have therefore sought to describe typologies of routes using descriptive statistics as well as some maps. The completed MFA highlights 3 different groups of mortality cases that are more or less dense depending on the nature and characteristics of the roads. The latter are not the only probable cause of collisions, the immediate environment as well as biological and behavioural factors also have an influence. We have suggested to stakeholders, with a view to strengthening the ERC-Lynx and its predictive power are searching for new data on ITTs and initiating their collection without being able to use them at this stage because they are too heterogeneous on the study area. Our first results have already brought about an awareness on the part of road and land use managers. It is possible to take action by integrating this vulnerable and emblematic cause, in particular its large vital field. In addition, a collaborative approach with Switzerland and Germany will be an asset in order to act at European level on the causes influencing the accident and to reach common recommendations.

- Lynx • Collisions • Road typology • Mitigation measures • Road ecology •

ANNEXE 5 : Plaquette de présentation 2021 du projet ITTECOP ERC-Lynx.

PROJET ERC-LYNX

Appel à projet ITTECOP 2017-2020



Eviter, Réduire et Compenser le risque de mortalité du Lynx boréal (*Lynx lynx*) par collision avec les véhicules de transport terrestres

OBJECTIFS ET ENJEUX DU PROJET

Le développement des infrastructures de transport terrestres (ITT) et le morcellement croissant des paysages ont un impact sur la faune sauvage, au travers du **risque de collisions** avec les véhicules et de la **perte d'habitat favorable**.

Le **Lynx boréal** (*Lynx lynx*), une des trois espèces protégées de grands carnivores en France, n'échappe pas à ces menaces. Plus particulièrement, les collisions avec les véhicules sont l'une des **principales causes** de mortalité du Lynx en France et ailleurs en Europe.

Ainsi, les projets d'aménagement (qu'ils soient routiers ou bâti) sont autant de projets susceptibles d'impacter la viabilité des populations de Lynx à plus ou moins long terme. D'ailleurs, les porteurs de projets d'aménagement entrepris dans des zones où le Lynx est potentiellement présent doivent réaliser une évaluation environnementale et mettre en œuvre la **séquence Éviter-Réduire-Compenser** (ERC).

C'est dans ce contexte que l'outil ERC-Lynx a été développé comme un **outil d'aide à la décision** pour enrichir les réflexions autour des projets d'aménagement et guider les acteurs du territoire dans le choix le **moins impactant**. Pour cela, il évalue les effets de projets aménagements sur la viabilité des populations de Lynx à l'horizon de 50 ans.

L'EQUIPE PROJET

L'équipe projet est composée de membres du Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive (CEFE), du Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema), du Centre de recherche et d'observation sur les carnivores (CROC) et de l'Office Français de la Biodiversité (OFB).



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité





LE LYNX BOREAL (*Lynx lynx*)

ÉLÉMENS DE CONNAISSANCE SUR LE LYNX ET LA SÉQUENCE ERC

STATUT DU LYNX BORÉAL EN FRANCE ET EN EUROPE

L'aire de répartition du Lynx boréal, en France, se concentre principalement dans le Massif Jurassien qui constitue le noyau principal de présence de l'espèce. Les deux autres zones de présence sont le Massif Alpin, où l'aire de présence reste stable, et le Massif des Vosges où le Lynx est en danger critique d'extinction (statut IUCN pour la population vosgienne-palatine).



- Listes mondiale et européenne : préoccupation mineure (LC)
- Liste française : en danger (EN)



- Espèce protégée / Espèce protégée menacée d'extinction
- Liste des espèces prioritaires pour les politiques publiques
- Plan Régional d'Actions Lynx « Massif des Vosges » (2020)
- Plan National d'Actions (en cours de finalisation)



- Convention de Berne : Annexe III
- Directive Habitats Faune-Flore modifiée : Annexe II, IV (V)



- Convention de Washington : Annexe II
- Règlement communautaire CITES : Annexe A



Lynx boréal photographié dans le Massif du Jura en France (Crédit photo : Sylvain Gatti).



Lynx boréal mort par collision en 2009 sur la commune de Fuans dans le département du Doubs, en bordure de la RD461 (Crédit photo : Emmanuel Renaud - ONCFS / SD25).

MENACES, PLANS D'ACTIONS ET OUTIL ERC-LYNX

Actuellement, la perte d'habitat, le développement des infrastructures de transport terrestre, la mortalité accidentelle par collision et les destructions illégales sont autant de menaces qui pèsent sur les populations de Lynx en France. En France, près de 60% des lynx retrouvés morts sont concernés par des collisions routières ce qui souligne l'importance de développer de nouveaux outils favorisant la prise en compte de cette espèce dans les projets d'aménagement du territoire. Les plans d'actions déclinés au niveau national (PNA Lynx) et régional (PRA Lynx « Massif des Vosges ») visent la restauration de l'espèce dans un état de conservation favorable, notamment par la réduction du risque de collision et le maintien, voire la restauration, des continuités écologiques qui lui sont favorables. L'outil ERC-Lynx doit contribuer à cela, notamment dans le cadre de l'application de la séquence ERC.

LA SÉQUENCE ÉVITER-RÉDUIRE-COMPENSER (ERC)

Les projets d'aménagement routiers et bâtis constituent des projets susceptibles d'impacter la viabilité à plus ou moins long terme des populations transfrontalières de Lynx présentes en France (Palatinat-Vosges/Jura/Alpes). Aujourd'hui, les services en charge de réaliser l'évaluation environnementale et d'appliquer la séquence ERC pour un projet d'aménagement dans une zone de présence du Lynx, s'appuient uniquement sur une analyse à dire d'expert à l'échelle locale. **A présent, l'outil ERC-Lynx peut être utilisé de manière complémentaire** en mesurant les conséquences de tels impacts sur les populations de Lynx à l'horizon de 50 ans. Il permet aussi de comparer les effets positifs des mesures d'évitement (p.ex. recherche d'un nouveau tracé), de réduction (p. ex. la création d'un écopont), ou de compensation (p.ex. protection d'habitats forestiers).



Vue de la RD461 (deux fois deux voies) depuis l'écopont d'Orchamps Vennes dans le Doubs, où le passage de lynx a été confirmé (Crédit photo : Cerema Est).



LE PROJET ERC-LYNX

DEMARCHE PARTICIPATIVE MISE EN OEUVRE

En plus des nombreuses réunions de l'équipe projet, le développement de l'outil ERC-Lynx est le résultat d'une démarche participative et d'un important travail de co-construction.

REUNION DE LANCEMENT / 05.03.2018

La réunion de lancement a été l'occasion de présenter le projet ITTECOP ERC-Lynx auprès des acteurs potentiellement concernés et de les inviter à participer à la co-construction de cet outil prédictif. Il s'agissait du premier temps d'échange entre les porteurs du projet et les acteurs du territoire au cours duquel l'équipe porteuse, le projet et le calendrier des ateliers ont été présentés. Puis, la trentaine de participants a été invitée à poser des questions qui ont permis de faire émerger les premières idées à intégrer dans la construction du futur modèle sous-jacent au fonctionnement de l'outil. A l'issue de cette première rencontre, une grande partie des participants se sont engagés à suivre les ateliers suivants.



Réunion de lancement du projet ERC-Lynx le 05/03/2018 à Besançon (Crédit photo : CROC)

ATELIER N°1 / 05.06.2018

Suite à la réunion de lancement, un premier atelier a été organisé afin de poursuivre la co-construction de l'outil avec les acteurs. Suite à une présentation plus fine du modèle, des discussions se sont tenues collectivement sur les hypothèses sous-jacentes au modèle (en particulier, les hypothèses sur la biologie du Lynx). Ces échanges ont favorisé la compréhension de l'outil laissant présager une meilleure appropriation. Le caractère opérationnel de l'outil a aussi fait l'objet de discussions enrichissantes.



Premier atelier du projet ERC-Lynx le 05/06/2018 à Besançon (Crédit photo : CROC)

ATELIER N°2 / 27.09.2018

Lors de ce deuxième atelier, la présentation d'une première version de l'interface de l'outil ERC-Lynx a permis dans un premier temps de discuter des améliorations possibles en termes d'ergonomie notamment. Dans un second temps, un brainstorming des participants a conduit à des propositions de petits scénarios théoriques d'aménagement, testés et discutés ensuite.



Deuxième atelier du projet ERC-Lynx le 27/09/2018 à Besançon (Crédit photo : Cerema Est)

ATELIER N°3 / 24.09.2019

Pour ce dernier atelier de travail, chaque participant a été invité à venir avec son ordinateur afin de tester la version complète de l'interface. Un exercice test a été proposé en séance, toujours dans l'objectif de discuter des ultimes améliorations de l'outil, pour optimiser son appropriation lors de sa future diffusion.



Troisième et dernier atelier de travail du projet ERC-Lynx le 24/09/2019 à Besançon (Crédit photo : Cerema Est)



L'OUTIL ERC-LYNX

UN OUTIL ACCESSIBLE EN LIGNE ET FACILE D'UTILISATION

Outil ERC-Lynx

Projet

Modifier le réseau routier

Modifier le paysage

Modifier les populations de Lynx

Tester le scénario créé

Onglets de travail

Onglets explicatifs

Description du modèle Lynx-Collision-Habitat



L'un des enjeux majeurs du développement de l'outil ERC-Lynx a été de pouvoir **le mettre à la disposition des acteurs du territoire pour un usage ne nécessitant aucune connaissance préalable en modélisation ou en informatique**. Dans cet objectif, l'outil ERC-Lynx sera accessible en ligne et se déclinera sous la forme d'une interface (voir illustration à gauche) avec **deux onglets explicatifs** (*Projet* et *Description du modèle Lynx-Collision-Habitat*) et **quatre onglets de travail** (voir ci-dessous).

Modifier le réseau routier



Cet onglet permet de construire/simuler des projets d'aménagement au niveau du réseau routier (créer, modifier le type ou supprimer un segment routier, créer un passage à faune). Ces modifications vont impacter le risque de collision entre les lynx simulés par le modèle et les véhicules de transport et, par conséquence, la survie des individus.

Modifier le paysage



Cet onglet permet quant à lui de construire/simuler des scénarios d'aménagement du paysage (type de couvert). Ces modifications vont impacter la qualité d'habitat du Lynx et, par conséquence, la distribution dans le paysage des individus simulés par le modèle.

Modifier les populations de Lynx



Cet onglet permet de tester des scénarios d'évolution des populations de Lynx (retirer, déplacer ou ajouter des individus dans les différentes populations simulées dans l'outil).

Les résultats obtenus mettent en évidence l'évolution entre la situation des populations de Lynx lors de la conception de l'outil ERC-Lynx (situation initiale) et le projet d'aménagement testé pour quatre indices de viabilité : **le nombre de collision entre lynx et véhicule, le taux d'occupation du territoire par des femelles lynx résidentes, le nombre de passages de lynx en dispersion et la densité de lynx**. Ces indices de viabilité renseignent ainsi l'effet positif, nul ou négatif du projet d'aménagement sur les populations de Lynx sur 50 ans.

POUR ALLER PLUS LOIN

- Site internet du projet ERC-Lynx : <https://sites.google.com/view/erclynx/accueil>
- Site internet ITTECOP : www.ittecop.fr
- Portail technique de l'OFB sur le Lynx boréal : <https://professionnels.ofb.fr/fr/doc/lynx-boreal-lynx-lynx>
- PRA Lynx « Massif des Vosges » : <https://www.grand-est.developpement-durable.gouv.fr/consultation-du-public-du-pra-lynx-massif-des-a19133.html> et <https://sites.google.com/view/programmelynxfmassifdesvosges/accueil>
- PNA Lynx : <https://www.bourgogne-franche-comte.developpement-durable.gouv.fr/plan-national-d-actions-en-faveur-du-lynx-a8019.html>

FINANCEURS

Le Ministère de la Transition Ecologique (MTE), l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME), le Club des Infrastructures Linéaires de transports terrestres (CILB) et la Fondation pour la Recherche sur la Biodiversité (FRB), soutiennent le projet ERC-Lynx dans le cadre du programme ITTECOP et l'appel à projet 2018-2020. Le CROC a également reçu le soutien du Commissariat à l'aménagement du Massif des Vosges, de la DREAL Grand Est, de la Région Grand Est, de l'Union européenne dans le cadre du programme opérationnel FEDER-FSE «Lorraine et Massif des Vosges 2014-2020» et de la Fondation UEM.



CIL&B
Club Infrastructures
Linéaires et Biodiversité



CONTACTS

CEFE :	Aurélie COULON, Olivier GIMENEZ (olivier.gimenez@cefe.cnrs.fr)
Cerema Est :	Emilie BUSSON Luc CHRETIEN Alain MORAND (alain.morand@cerema.fr) Delphine SOUILLOT Lucille TOURNIER Anaïs CHARBONNEL
CROC :	Estelle GERMAIN (estelle.germain@croc-crea.org) Charlotte-Anaïs OLIVIER Sarah BAUDUIN (sarah.bauduin@ofb.gouv.fr) Nolwenn DROUET-HOGUET Christophe DUCHAMP
OFB :	