

RISK4DRAPTORS : PREDIRE LES RISQUES DE COLLISION DES GRANDS OISEAUX AVEC LES INFRASTRUCTURES AERIENNES

Synthèse

Janvier
2025



EXPERTISES

REMERCIEMENTS

L'équipe de Risk4DRaptors souhaite remercier les membres du comité de suivi de thèse dans le cadre de laquelle a été conduit le projet :

Paul Franc - ADEME

Alexandre Millon - IMBE

Pascal Marchand - OFB

Claude Miaud - CEFE

Olivier Gimenez - CEFE

CITATION DE CE RAPPORT

HEMERY Arzhela, DURIEZ Olivier, HENRY Pierre-Yves, ITTY Christian, BESNARD Aurélien. 2025. RISK4DRAPTORS : prédire les risques de collision des grands oiseaux avec les infrastructures aériennes. 27 pages.

Cet ouvrage est disponible en ligne <https://librairie.ademe.fr/>

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME

ADEME

20, avenue du Grésillé

BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 2105D0034

Étude réalisée par Arzhela HEMERY, Olivier DURIEZ, Pierre-Yves HENRY, Christian ITTY et Aurélien BESNARD, pour ce projet financé par l'ADEME

Projet de recherche coordonné par : Aurélie BESNARD, UMR5175 Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive

Appel à projet de recherche : AAP R&D Energie Durable Edition 2020/2021

Coordination technique - ADEME : FRANC Paul

Direction/Service : Service Electricité Renouvelable & Réseaux / SE2R

SOMMAIRE

ABSTRACT.....	5
1. CONTEXTE, ENJEUX ET POSITIONNEMENT DU PROJET	6
1.1. Contexte et enjeux.....	6
1.2. Etat de l’art scientifique et caractère innovant du projet	6
1.3. Objectifs généraux du projet.....	8
1.3.1. Objectifs scientifiques et techniques	8
1.3.2. Objectifs socioéconomiques et réglementaires	9
1.3.3. Objectifs environnementaux.....	9
1.4. Partenaires du projet	10
2. MODELE D’ETUDE ET ORGANISATION DU PROJET	10
2.1. Présentation du modèle d’étude et des données disponibles	10
2.2. Phase préliminaire : étude de la période d’apprentissages des jeunes aigles royaux	11
2.3. Développement d’une méthode de sélection d’habitats en trois dimensions	11
2.4. Courants thermiques et orographiques : des variables décrivant l’espace aérien utilisé par les oiseaux planeurs	12
3. BILAN / PRINCIPAUX RESULTATS OBTENUS.....	13
3.1. Période d’apprentissages des jeunes aigles royaux	13
3.2. Sélection d’habitats en trois dimensions par les aigles royaux et risque de collisions	14
3.2.1. Résumé de la méthode développée et des résultats obtenus pour les aigles royaux	14
3.2.2. Exemple d’application des résultats de risque de collision des aigles royaux avec les infrastructures aériennes	15
3.3. Conditions pour répliquer la méthode à d’autres espèces	16
3.4. Outil développé et améliorations possibles	18
4. SCHEMA RECAPITULATIF	20
5. CONCLUSION	20
6. VALORISATION DU PROJET	21
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	22
INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES.....	25
SIGLES ET ACRONYMES	25

RÉSUMÉ

La perte de la biodiversité est une crise majeure de l'anthropocène à laquelle l'humanité est actuellement confrontée. Le changement climatique est une des causes principales de cette crise, qui affecte aussi les sociétés humaines. Pour faire face au changement climatique, une des stratégies adoptées vise à décarboner la production d'énergie et à opter pour son électrification à l'aide d'énergies renouvelables. Ces orientations induisent la construction d'infrastructures aériennes comme les éoliennes et l'extension des réseaux de transport d'électricité, ce qui n'est pas sans conséquence pour la faune et la flore (pertes d'habitats, mortalités par collisions), et peut ainsi aggraver la perte de biodiversité. Les grands oiseaux planeurs, comme les accipitridés, sont des espèces très sensibles au développement de ces infrastructures. Leur écologie et leurs modes de vol les placent en effet en conflit d'utilisation de l'espace aérien avec ces infrastructures. Leur dynamique de populations est aussi très sensible aux mortalités additionnelles. Plusieurs de ces espèces sont présentes sur la liste rouge de l'IUCN et protégées à l'échelle française et européenne. Ces espèces « à enjeux » sont donc à prendre en compte dans la planification et les études d'impacts précédant l'implantation des infrastructures aériennes. Il est cependant difficile de définir sur le terrain les zones d'importance pour ces espèces et donc de préconiser des secteurs où il faudrait éviter d'implanter ces infrastructures. Les avancées technologiques récentes, avec la miniaturisation des balises de télémétrie GPS, permettent de suivre des individus d'espèces aviaires en continu, en enregistrant leur localisation et leur hauteur de vol. L'objectif de ce projet était de développer un cadre méthodologique pour prédire les zones à risque de collision pour les grands oiseaux planeurs avec les infrastructures aériennes se basant sur leur utilisation des habitats naturels et leurs hauteurs de vol. Cette démarche a été développée sur l'aigle royal, mais réfléchie pour être répliquable à d'autres espèces d'oiseaux.

Dans un premier temps, les conditions nécessaires à l'utilisation des données télémétriques obtenues en équipant des jeunes aigles royaux au nid ont été étudiées afin d'augmenter le nombre d'individus mais aussi l'étendue géographique des données disponibles (et les habitats naturels associés) pour les modèles statistiques. Ces jeunes sont peu mobiles lorsqu'ils sont au nid et donc plus faciles à capturer que les adultes. Cependant, après l'envol, ils passent par une période d'apprentissages pendant laquelle leurs techniques de vol et leur utilisation de l'espace et des habitats naturels peuvent différer de celles des adultes. Les résultats obtenus montrent que, passé les deux premiers mois, les performances de vol sont ensuite établies et l'utilisation de l'espace et des habitats naturels par les jeunes deviennent alors très similaires à celles des adultes. Les données télémétriques des jeunes aigles royaux peuvent donc être utilisées, au même titre que celles des adultes, si l'on exclut les deux premiers mois après l'envol.

Dans un second temps, le risque qu'un aigle royal utilise un secteur pour ses déplacements a été modélisé, en fonction des habitats naturels qui composent ce secteur et en tenant compte de la hauteur à laquelle l'aigle vole. Pour cela, la méthode des « *step-selection functions* », classiquement utilisée pour modéliser la sélection d'habitats lors de déplacement en deux dimensions, a été adaptée à une sélection d'habitats en trois dimensions. En effet, ne pas tenir compte de la hauteur de vol peut conduire à surestimer le risque dans certains secteurs où, en réalité, les oiseaux volent très haut et ne sont donc pas en conflit d'utilisation de l'espace aérien avec les infrastructures. Ce modèle inclue aussi la troisième dimension dans les variables d'habitats via des paramètres décrivant l'espace aérien, à savoir les courants ascendants thermique et orographique, qui ont été reconstitués à l'échelle nationale dans le cadre de ce projet. Les résultats sont consultables sous forme de cartes qui permettent de visualiser les secteurs les plus à risque de l'espèce d'intérêt. Elles ont été pensées comme un outil d'aide à l'évitement à destination des aménageurs et des décideurs.

<https://risk4draptors.cefe.cnrs.fr>

ABSTRACT

The loss of biodiversity is a major crisis of the Anthropocene that humanity is currently facing, with climate change being one of the main causes. One of the strategies adopted to tackle climate change is to decarbonize energy production and adopt electrification based on renewable energies. This is resulting in the construction of aerial infrastructures such as wind turbines and the extension of electricity transmission networks, which are not without consequences for flora and fauna (loss of habitat, death from collisions) and can thus increase the loss of biodiversity. Large soaring birds such as accipitrids are very sensitive to the development of these infrastructures. Their ecology and flight modes place them in conflict with infrastructure in terms of airspace use. Their demography is highly sensitive to additional mortality. Several of these species are on the IUCN red list and are protected in France and Europe. These species therefore need to be considered in planning and impact surveys prior to the installation of aerial infrastructures. However, it is difficult to define in the field the areas of importance for these species, and therefore to recommend sectors where these infrastructures should be avoided. Recent technological advances, with the miniaturization of GPS tags, make it possible to track individuals continuously, by recording the birds' X-Y coordinates and flight height. The aim of this project is to develop a methodological framework for predicting areas at risk of collision for large gliders with aerial infrastructures, as a function of natural habitats and flight heights. This approach has been developed for golden eagles, but is designed to be replicable for other species.

Firstly, we studied the conditions required to use telemetry data obtained by equipping young golden eagles at nest, in order to increase not only the number of individuals but also the geographical extent (and associated natural habitats) in statistical models. These young birds are not very mobile when they are in the nest and are therefore easier to capture than adults. However, after fledging, they go through a learning period during which their flight skills and their use of space and natural habitats may differ from those of adults. The results obtained show that, after the first two months, flight skills are established and the use of space and natural habitats becomes very similar to those of adults. Telemetry data from young golden eagles can therefore be used in the same way as those from adults, if we exclude the first two months after fledging. This section is a preliminary step, essential for integrating juvenile data into the approach.

Secondly, we modelled the risk of a golden eagle using an area for its movements, based on the natural habitats that compose it and considering the height at which it flies. To do this, we adapted the "step-selection functions" method classically used to model habitat selection during 2D movements, to 3D habitat selection. Indeed, not taking flight height into account can lead to an overestimation of the risk in certain sectors where, in reality, birds fly very high and are therefore not in conflict with infrastructure in terms of airspace use. This model also includes the third dimension in the habitat variables via parameters describing the airspace, namely thermal and orographic updrafts. The results can be consulted in the form of maps, and have been designed as an avoidance tool for planners and decision-makers.

<https://risk4draptors.cefe.cnrs.fr>

1. Contexte, enjeux et positionnement du projet

1.1. Contexte et enjeux

Les infrastructures aériennes que sont les éoliennes, mais aussi les câbles aériens, représentent des barrières difficilement détectables, pour lesquelles les grands oiseaux ne possèdent pas de réponse comportementale adaptée, et qui s'avèrent souvent mortelles en cas de collision (Bech et al. 2012, Loss 2016, Allison et al. 2017, Hunt et al. 2017). Les grands rapaces, mais également les autres grands planeurs de manière générale, font ainsi partie des espèces classées comme les plus fréquemment impactées par les collisions avec ces infrastructures aériennes (Thaxter et al. 2017). De par ces risques, les aménageurs, les porteurs de projets, ou encore les services de l'Etat, doivent, pour ces espèces protégées, se placer dans le cadre de la séquence Eviter-Réduire-Compenser (ERC). Pourtant, pour de telles espèces occupant de très vastes domaines vitaux, il est complexe d'identifier, par de simples visites sur le terrain, à la fois les zones de moindre impact pour « Eviter » (pour implanter au mieux les futures infrastructures aériennes) mais aussi les zones à fort risque pour « Réduire » (par exemple en équipant les éoliennes de dispositifs d'effarouchement) ou « Compenser ». De ce fait, malgré la mise en œuvre de la séquence ERC, ces espèces subissent encore d'importantes mortalités dues aux collisions ou percussions avec ces infrastructures aériennes, en France comme dans le reste du monde. Il y a donc un enjeu crucial pour leur conservation à améliorer leur prise en compte dans cette séquence via le développement de méthodes d'évaluation des risques appropriées. Par ailleurs, du fait de la persistance de ces mortalités, les opérateurs de la filière éolienne et du transport d'électricité font face de plus en plus régulièrement à des contentieux. Le développement des filières exploitant ces infrastructures aériennes ne pourra se faire qu'en réduisant ce risque de contentieux, et donc en prenant mieux en compte les risques pour les grands oiseaux planeurs en amont des projets.

Face au constat de la persistance des mortalités et des risques économiques associés, certains projets de développement d'infrastructures sollicitent des autorisations pour équiper de balises GPS un certain nombre d'espèces d'oiseaux dites « patrimoniales » (milans, aigles, vautours, cigognes, grues, etc.) pouvant être impactées par ces infrastructures, afin d'appréhender leurs déplacements à proximité de ces (futurs) aménagements, et donc de disposer d'éléments précis pour mettre en œuvre la séquence ERC. Cependant, dans la majorité des cas, ces projets d'équipements télémétriques ne permettent de collecter qu'un très petit nombre de données et donc n'autorisent qu'une faible puissance statistique pour inférer avec précision le degré de risque. De fait, ces données de télémétrie ne sont en général pas exploitées par la suite, ou sont largement sous-exploitées. L'autorisation pour équiper les oiseaux de balises télémétriques est délivrée par le Centre de Recherches sur la Biologie des Populations d'Oiseaux (CRBPO, plateforme du Muséum National d'Histoire Naturelle coordonnant le marquage d'oiseaux à des fins scientifiques en France). Pour obtenir une telle autorisation (dérogation à la protection des espèces), les demandeurs (associations, bureaux d'étude, etc.) doivent soumettre un dossier dans lequel ils doivent démontrer la pertinence scientifique du projet d'étude télémétrique, ainsi que leur compétence à exploiter les données de manière rigoureuse (analyses statistiques) pour répondre aux enjeux d'expertise locale ou globale. Or, très souvent, les demandeurs n'ont pas conscience des limites des données qu'ils vont collecter, ni connaissance des méthodologies analytiques adaptées, et ne pensent pas à mobiliser les données déjà existantes afin d'accroître la fiabilité et la précision du risque local estimé. Ces constats questionnent le bienfondé éthique (*quelle justification à équiper des individus d'espèces protégées, une démarche intrusive, si les données ne sont pas pleinement exploitées ? pourquoi ne pas mobiliser les données déjà existantes ?*) et scientifique (*quelle est la fiabilité des résultats obtenus sur quelques individus ? comment peut-on les généraliser à la population ou à d'autres espèces ?*) de telles études télémétriques d'oiseaux d'espèces protégées.

Les porteurs du présent projet de recherche (CEFE, CRBPO) reçoivent chaque année de nombreuses sollicitations d'acteurs de la filière (notamment éolienne) pour fournir une aide à l'analyse statistique des données collectées par ces programmes dans le but de produire de telles évaluations de risque local basées sur des données de télémétrie. Ceci témoigne d'un besoin important de la filière de disposer de ces connaissances, besoin qui n'était jusqu'à présent comblé par aucun interlocuteur de la filière, notamment par manque d'une méthodologie adaptée. En effet, le cadre méthodologique général de ce type d'analyses n'était pas formalisé. Le développement de ce cadre méthodologique, et des outils analytiques associés, représentait donc un enjeu majeur de recherche appliquée pouvant avoir un impact très fort sur l'ensemble des opérateurs portant ces demandes de développement d'infrastructures, mais également pour la protection de la biodiversité, et c'était le cœur du présent projet de recherche.

1.2. Etat de l'art scientifique et caractère innovant du projet

Le déploiement d'éoliennes à travers le territoire français, comme dans de nombreux pays à travers le monde, est un des piliers de la transition énergétique. Parallèlement, le développement d'infrastructures de transport d'électricité (câbles aériens) est déjà très conséquent sur l'ensemble du territoire national. Une partie de ce réseau de transport doit d'ailleurs être soit prolongée, soit renouvelée dans les années à venir. Cependant, le développement de ces aménagements génère des mortalités directes d'oiseaux via des collisions (Allison et al. 2017, Watson et al. 2018) en particulier pour les grands

oiseaux tels que les rapaces ou les grands oiseaux planeurs en général comme les cigognes, les grues, les pélicans (Bech et al. 2012, Loss 2016, Allison et al. 2017, Hunt et al. 2017). Lorsqu'elles concernent des espèces à longue durée de vie comme c'est le cas de les grands rapaces, les mortalités induites ont un impact majeur sur la dynamique de ces populations, dynamique qui est très sensible aux variations des taux de survie des adultes (Sæther and Bakke 2000, Sæther et al. 2016). Les grands planeurs, et notamment les grands rapaces, font ainsi partie des espèces classées comme les plus fréquemment impactées par les collisions (Thaxter et al. 2017). Ces infrastructures aériennes ont aussi des conséquences indirectes sur les populations en réduisant notamment l'habitat disponible (zones d'alimentation, de nidification, etc.) et en modifiant l'accès à des espaces vitaux de par l'évitement de ces zones anthropisées par les oiseaux (Carrete et al. 2009, Watson et al. 2018). Comprendre comment les populations d'espèces ayant un usage de l'espace aérien les exposant aux infrastructures anthropiques exploitent cet espace et comment ces infrastructures influent sur cette utilisation de l'espace est donc crucial pour prédire l'impact de futurs aménagements et mitiger ces impacts notamment à travers une implantation minimisant les risques de collision ou d'altération de l'espace vital aérien (Eviter) ou en priorisant l'équipement d'infrastructures existantes à l'aide de dispositifs de visibilité (lignes électriques, câbles divers) ainsi que d'effarouchement ou bridage pour les éoliennes (Réduire).

Depuis une vingtaine d'années, le risque de mortalité par collision avec les infrastructures aériennes est très étudié pour différentes espèces et notamment les rapaces, espèces particulièrement sensibles de par leurs comportements de vol (Thaxter et al. 2017, Watson et al. 2018, D'Amico et al. 2019). Ces études se basent très souvent sur des décomptes de cadavres autour de ces infrastructures pour estimer un taux de mortalité et modéliser le risque de collision à partir de modèles théoriques reposant sur différents facteurs tels que les caractéristiques de l'infrastructure impliquée (Tintó et al. 2010, Sarasola et al. 2020), la saisonnalité ou les conditions météorologiques (Barrios and Rodríguez 2004), la densité des populations (Garvin et al. 2011), le micro-habitat local ou la topographie (Barrios and Rodríguez 2004). Cependant, certains auteurs (e.g. Masden and Cook 2016) ont montré que ces modèles théoriques de risque de collision étaient limités à des situations bien précises, qu'ils étaient perfectibles, et qu'ils étaient rarement validés par des données de terrain indépendantes. Par ailleurs, ces modèles sont difficilement généralisables à large échelle du fait du type de paramètres utilisés qui sont très contexte-dépendants. Ils préconisent de ce fait d'utiliser des données de télémétrie 3D, une technologie actuellement de plus en plus abordable, pour étudier précisément les risques de collision.

Il existe quelques études utilisant de telles données de télémétrie pour modéliser, voire prédire, le risque de collision des grands rapaces avec les infrastructures aériennes (Reid et al. 2015, Péron et al. 2017, Tikkanen et al. 2018, Hanssen et al. 2020, Murgatroyd et al. 2021) mais elles sont peu nombreuses. Les études respectives de Reid, de Murgatroyd et de Tikkanen ont ainsi permis de prédire les zones à risques où trois espèces de rapaces (respectivement gypaète barbu (*Gypaetus barbatus*), aigle de Verreaux (*Aquila verreauxii*) et aigle royal (*Aquila chrysaetos*)) pourraient être impactées par des futures installations d'éoliennes. Cependant, ces études sont restreintes à l'Afrique du Sud pour les deux premières espèces et à la Finlande pour la troisième, alors que deux de ces espèces sur trois nichent également en France mais dans des conditions paysagères très différentes (moyenne et haute montagne). En utilisant une approche basée sur des données de télémétrie, Murgatroyd et al. (2021) ont montré que le risque de collision avec des éoliennes pour les aigles de Verreaux en Afrique du Sud diminuait avec la distance au nid et la distance au relief, mais augmentait avec le degré de pente. Néanmoins, ces trois études font toutes uniquement appel à des variables décrivant l'habitat terrestre (occupation du sol, relief, etc.) sans prendre en compte de paramètres d'aérologie alors qu'elles traitent d'espèces utilisant l'espace aérien, et qui sont donc très dépendantes de ces paramètres d'aérologie pour leurs déplacements. A l'opposé, d'autres auteurs ont utilisé de telles données télémétriques pour étudier l'utilisation des masses d'air par des grands rapaces, soit pour discriminer les types de vol (Bohrer et al. 2012, Santos et al. 2017), soit pour étudier le risque de collision avec des infrastructures aériennes (Péron et al. 2017, Hanssen et al. 2020). Ces auteurs montrent bien l'importance des courants ascendants et descendants, à la fois thermiques et orographiques, dans l'exploitation de l'espace aérien par les grands rapaces, mais aucun ne combine ces informations avec l'exploitation de l'habitat terrestre, qui est pourtant déterminant pour caractériser la fréquence d'utilisation des zones et donc du risque de collision. Les études existantes se basent donc soit sur des données d'occupation du sol et de topographie (Braham et al. 2015, Reid et al. 2015, Singh et al. 2016, Tikkanen et al. 2018, Murgatroyd et al. 2021), soit sur des données d'aérologie (Péron et al. 2017, Hanssen et al. 2020), mais aucun de ces modèles ne combine ces deux déterminants majeurs de l'usage de l'espace aérien par les grands oiseaux. Or, le temps passé par ces espèces sur un site plutôt qu'un autre dépend à la fois de l'habitat terrestre et de leurs critères de sélection, mais aussi des conditions de vol dans ces secteurs.

Comprendre et prédire le risque de collision avec des infrastructures anthropiques implique donc de comprendre l'utilisation de l'espace en trois dimensions par les oiseaux (où et à quelle hauteur de vol ?), et cela en lien avec les habitats et les conditions d'aérologie. Le présent projet se proposait donc de mettre en évidence les zones à risque de collision pour les grands rapaces, en considérant leurs déplacements en trois dimensions ainsi que leur utilisation de l'espace aérien. Cette compréhension est aussi nécessaire pour une meilleure connaissance globale de l'écologie des grands rapaces et plus généralement des grands planeurs.

Par ailleurs, il est aussi fondamental que cette connaissance puisse être accessible et réellement mobilisable/mobilisée par les opérateurs ou développeurs d'infrastructures aériennes. Auparavant, aucun outil opérationnel ne permettait à ces opérateurs de mobiliser facilement ces connaissances (c'est-à-dire sans passer par une collaboration au long-court avec un

laboratoire de recherche en écologie par exemple). Le présent projet se proposait donc d'améliorer les travaux déjà publiés sur la prédiction de l'utilisation de l'espace et de prédiction du risque pour les grands rapaces et planeurs, mais également de rendre disponible aux différentes parties prenantes ces connaissances acquises. Pour cela, le développement d'un outil opérationnel a été proposé à destination des aménageurs d'infrastructures, des collectivités territoriales, des services de l'Etat ou des gestionnaires d'espaces protégés leur permettant de prédire quels sont les secteurs présentant un risque fort de collision de grands rapaces lors de la création de nouvelles infrastructures.

Cette démarche a été développée sur une espèce en particulier, l'aigle royal, comme une démonstration de sa faisabilité et de sa pertinence, à l'échelle de son aire de répartition française. Une fois validée sur l'aigle royal, la démarche a ensuite été appliquée à une autre espèce, le vautour fauve (*Gyps fulvus*) afin de vérifier sa reproductibilité à d'autres espèces. Le caractère innovant de ce projet était qu'il proposait une modélisation en trois dimensions du risque de collision pour les grands rapaces avec les infrastructures aériennes, dont les résultats ont été mis à disposition via un outil en accès libre sur internet (<https://risk4draptors.cefe.cnrs.fr>). L'innovation reposait par ailleurs sur le fait d'intégrer, dans une même approche, les questions théoriques et concrètes de terrain, d'utilisation de l'espace et de risque de collision par les grands rapaces dans l'objectif de construire un outil de prédiction cartographique d'aide à la décision de mesures d'évitement, de réduction voire de compensation.

Ce projet, via l'outil proposé, s'inscrivait pleinement dans l'axe thématique n°1 de l'appel à projets « R&D Energie durable » qui visait l'optimisation des systèmes énergétiques et la réduction de leurs impacts, notamment sur la biodiversité. L'implication des acteurs opérationnels et territoriaux dans la conception de cet outil représentait également une part importante de ce projet, afin que l'outil développé soit didactique et réponde pleinement à leurs attentes. Cet outil pourra s'intégrer aux études d'impacts sur l'environnement dont un des objectifs est d'aider à la conception d'un projet par la prise en compte des enjeux et des sensibilités des lieux. Ce projet, dont la démarche d'élaboration sur l'aigle royal en France pourra ensuite être dupliquée à d'autres espèces et d'autres secteurs géographiques du territoire national voire international, devrait ainsi permettre de contribuer à l'amélioration de l'intégration des infrastructures aériennes dans leurs environnements.

1.3. Objectifs généraux du projet

1.3.1. Objectifs scientifiques et techniques

L'objectif de ce projet était de développer un cadre de travail intégrateur visant à répondre aux besoins des parties prenantes (opérateurs, services de l'Etat, bureaux d'études, associations, etc.) tout en maximisant l'exploitation des données de télémétrie déjà collectées. Pour ce faire, le développement d'un outil de prédiction du risque pour les aigles royaux a été proposé, dont la démarche est répliquable aux autres grands oiseaux planeurs de manière générale :

- i) une modélisation de l'utilisation de l'espace en trois dimensions à partir de la mutualisation d'un ensemble de données déjà disponibles pour l'aigle royal ;
- ii) une prédiction des secteurs à risque issue de cette modélisation pour permettre l'évitement voire du « *micro-siting* » (ajustement de la position d'une infrastructure).

Cette démarche permet à la fois de maximiser l'utilisation des données disponibles par leur mutualisation à l'échelle nationale, et de réduire la nécessité de suivre par télémétrie de nouveaux individus dès lors que les prédictions de risque sont considérées comme fiables (c'est-à-dire que le suivi télémétrique de quelques individus supplémentaires à l'échelle locale serait inutile car il n'améliorerait pas la fiabilité et la précision du risque prédit).

Cette démarche présentait l'intérêt de rendre la démarche globale plus respectueuse des animaux (éthique), d'augmenter la pertinence scientifique (mutualisation des données permettant une plus grande généralisation des résultats), mais aussi de réduire les budgets pour les opérateurs en évitant d'équiper plus d'oiseaux que nécessaire (économie en matériel télémétrique coûteux, et aussi et surtout en temps d'agent sur le terrain pour réaliser les captures). Les résultats de ce projet sont mobilisables par les usagers via une application web qui donne accès aux prédictions pour la situation locale définie par l'utilisateur, sous forme cartographique. Les valeurs rapportées sont la probabilité relative d'utilisation de l'espace, interprétable comme un risque relatif de collision en cas de présence d'une infrastructure aérienne. Cette application web en accès libre peut donc être consultée en amont de l'élaboration des projets de développement d'infrastructures (cf. évitement et réduction). Dans le cas d'une prédiction précise, les résultats du modèle peuvent être utilisés pour la mise en œuvre de l'évitement et/ou de la réduction. Dans le cas d'une prédiction de moins bonne qualité, il pourra être examiné la pertinence d'améliorer la précision des prédictions sur une zone visée par un nouveau projet d'infrastructure en organisant le suivi télémétrique d'oiseaux supplémentaires dans cette zone.

Cette démarche a été développée sur une espèce en particulier, comme une démonstration de sa faisabilité et de sa pertinence, à savoir sur l'aigle royal, à l'échelle de son aire de répartition française dans la moitié Sud de la France, concernée

par une forte densité de câbles aériens et par un important développement de la filière éolienne. Cette espèce est aussi le modèle d'étude d'un exemple historique, à Altamont Pass aux Etats-Unis, où un sixième des aigles suivis par télémétrie ont été victime de collision avec les éoliennes ou les lignes électriques (Katzner et al. 2017). L'aigle royal est présent dans tout l'hémisphère nord et de nombreuses mortalités liées aux infrastructures aériennes ont également été relevées dans plusieurs pays comme en Ecosse, en Scandinavie ou en Espagne (Fielding et al. 2006, Hipkiss et al. 2014, Mojica et al. 2018). Enfin, ce choix s'est porté sur cette espèce car son occupation de l'espace est contrainte par de nombreux projets d'infrastructures aériennes en France, et le CEFE associé à BECOT, disposait déjà de plus d'une centaine d'individus équipés d'émetteurs GPS ayant permis de collecter plus de 50 millions de localisations depuis 2014. Sa reproductibilité à d'autres espèces a également été testée car le CEFE disposait aussi des données de suivis télémétriques d'une centaine de vautours fauves des Pyrénées jusqu'aux Alpes.

Les deux chercheurs du CEFE impliqués dans le présent projet étaient également les co-pilotes scientifiques du programme national de recherche MAPE (« Mortalité Aviaire sur les Parcs Eoliens », <https://mape.cnrs.fr>). Ce programme rassemblait plus de 150 personnes d'une centaine de structures différentes qui étaient organisées autour d'un groupe multi-acteurs animé par le biais de séminaires et d'ateliers, et qui regroupait l'ensemble des acteurs impliqués dans le développement de la filière éolienne en France (opérateurs, Etat, associations, collectivités, bureaux d'étude, etc.). Les acteurs ont ainsi été mobilisés pour co-construire les questions de recherche avec les chercheurs impliqués mais aussi valider les choix méthodologiques. Une intégration officielle du présent projet dans MAPE a été validée par le COPIL de MAPE le 26 janvier 2023. La conception de l'application web a ainsi bénéficié de l'expérience acquise au travers de MAPE, basée sur une démarche de recherche participative. L'intégration des attentes des opérateurs techniques, des aménageurs d'infrastructures et des collectivités territoriales ou services de l'Etat a été possible grâce à un atelier dédié à une réflexion commune sur l'ergonomie de l'application web et les documents à y associer.

1.3.2. Objectifs socioéconomiques et réglementaires

Dans le contexte actuel de la séquence ERC qui fonde les dérogations ministérielles à la protection des espaces et des espèces pour le déploiement de ces infrastructures, un tel travail était susceptible d'alimenter le volet « Eviter », qui apparaissait comme le parent pauvre de la séquence. Il pouvait aussi permettre de « Réduire » (priorisation du déploiement de dispositifs d'évitement, également un des objectifs de MAPE que ce projet est venu compléter), voire de « Compenser », par exemple en identifiant des mesures de gestion de l'habitat naturel restituant à proximité les espaces vitaux (p. ex. terrains de chasse) détruits par les aménagements (Allen and Singh 2016).

Les opérateurs et les bureaux d'études devant se placer dans la démarche ERC au moment de la conception de leurs projets, cet outil peut être directement utilisé lors des études d'impacts sur l'environnement auxquelles ils doivent s'astreindre. De plus, cet outil peut permettre d'accompagner l'Etat dans ses Plans Nationaux d'Action (PNA) en faveur des grands rapaces, l'identification des zones à risques de collision avec les infrastructures aériennes représentant une problématique récurrente dans tous ces programmes de conservation. Cet outil est aussi susceptible d'être utilisé pour la planification à long terme du développement éolien en France, démarche en cours portée par le Ministère de la Transition Ecologique.

1.3.3. Objectifs environnementaux

Par la mise en évidence des zones à risque de collision pour les grands rapaces, l'outil peut permettre une meilleure implantation des infrastructures aériennes au regard de l'utilisation de l'espace en trois dimensions par ces oiseaux. Une réduction du risque de collision devrait avoir un impact positif sur le taux de mortalité adulte de ces populations, dont la dynamique de population est très sensible à la survie des individus ayant atteint l'âge de reproduction, et donc contribuer à l'amélioration de leur statut de conservation.

Cet outil doit également permettre d'éviter de capturer et d'équiper d'émetteurs GPS plus d'oiseaux que nécessaire. En effet, les seuls individus qui pourraient faire l'objet de capture seraient ceux dont les territoires sont concernés par l'implantation de nouvelles infrastructures aériennes dans des zones géographiques où la qualité des prédictions des modèles ne serait pas suffisante pour évaluer les niveaux de risque associés aux secteurs d'implantation de ces infrastructures. Cette démarche est en accord avec les préconisations des Comités d'Ethique.

1.4. Partenaires du projet

Le projet a été financé pour trois ans, de 2021 à 2024, correspondant à la durée de réalisation de la thèse de doctorat d'Arzhela Hemery qui était le socle de ce projet, et mené en coopération entre les partenaires suivants :

Tableau 1 : Partenaires du projet

Structure	Partenaire	Fonction
CEFE - CNRS - UMR5175 (Coordinateur)	Aurélien Besnard Olivier Duriez Arzhela Hemery	Directeur d'études, EPHE Maitre de conférences, UM Doctorante, EPHE
MECADEV / CRBPO - UMR7179	Pierre-Yves Henry	Professeur, MNHN
Association BECOT	Christian Itty	Président, BECOT

2. Modèle d'étude et organisation du projet

2.1. Présentation du modèle d'étude et des données disponibles

Le projet proposé ici s'appuyait sur le modèle de l'aigle royal. Il s'agit d'une espèce territoriale, occupant de vastes domaines vitaux. Chez cette espèce particulièrement longévive, dont la dynamique des populations est très sensible à la survie des adultes, chaque mortalité d'adulte par collision peut fortement impacter la viabilité de la population locale (Sæther and Bakke 2000, Guil et al. 2011, Miller et al. 2014, Sæther et al. 2016, Hunt et al. 2017, Tack et al. 2017, Mojica et al. 2018, Marques et al. 2020). En France, comme partout en Europe, au cours du 19^e siècle et jusque dans les années 1970, les populations d'aigles royaux ont fortement décliné (Bechard and Mcgrady 2002). Depuis les années 1970-1980, grâce aux premiers arrêtés de protection des espèces ainsi qu'aux réglementations européennes, et notamment la Directive Oiseaux, ces populations ont pu reconstituer leurs effectifs et l'espèce n'est plus en danger d'extinction (Fasce et al. 2011). L'aigle royal est maintenant présent dans tous les massifs montagneux du Sud de la France, des Pyrénées aux Alpes du Nord et au Jura en passant par le Massif Central et la Corse.

Malgré un suivi de l'aigle royal depuis de nombreuses années, tant par des agents d'espaces protégés que par des réseaux associatifs, son utilisation de l'habitat en deux dimensions comme en trois dimensions est encore mal connue. Des données de télémétrie provenant d'une vaste zone d'étude en France (de l'Aude jusqu'en Savoie en passant par le Sud du Massif Central et les pré-Alpes) étaient à disposition. Dans cette zone, des aigles royaux étaient suivis par télémétrie, permettant de les localiser dans les trois dimensions spatiales et cela au cours du temps. Cette zone d'étude présentait des conditions climatiques, topographiques et d'habitats diversifiées et contrastées. Cette étendue géographique, la diversité des habitats naturels fréquentés par l'espèce ainsi que la disponibilité de nombreuses données de télémétrie en trois dimensions ont fait de cette espèce un des meilleurs modèles d'étude possible pour ce projet en France.

En dehors de son intérêt comme modèle d'étude, l'aigle royal est aussi une espèce protégée, à forte valeur patrimoniale et emblématique, qui est à prendre en compte dans la séquence ERC. C'est d'ailleurs le cas dans un certain nombre de projets actuels d'infrastructures (éoliennes dans le Sud de la France, ligne THT dans la Durance, etc.). L'implantation d'infrastructures aériennes sur le domaine vital d'un couple d'aigles territoriaux peut cependant fortement impacter l'exploitation de ce territoire par ces oiseaux et les priver de zones de chasse riches en proies ou de secteurs propices à la reproduction (Drewitt and Langston 2006, Itty and Duriez 2018, Marques et al. 2020). Comprendre comment les aigles royaux utilisent leur territoire et l'espace aérien est donc primordial pour mettre en évidence les secteurs où ils peuvent être en conflit d'utilisation de cet espace aérien avec des infrastructures aériennes, et ainsi informer l'implantation de ces infrastructures afin de réduire leur impact sur ces populations.

Par ailleurs, la zone d'étude présentait également une variété d'infrastructures aériennes : des éoliennes (dans le Massif Central, l'Aude et la Drôme) et des câbles aériens (lignes THT et MT partout, remontées mécaniques dans les Alpes). Cette diversité de contextes géographiques ont ainsi permis de tester la fiabilité et la généralité des prédictions des modèles face à des situations contrastées. Ce point était important pour développer un modèle prédictif pertinent à destination des aménageurs et des collectivités territoriales, mais également pour explorer les conditions pour une démarche reproductible

pour d'autres espèces. Pour plus de précisions sur les données, se référer au manuscrit de thèse d'A. Hemery dont la référence est dans la liste bibliographique à la fin de ce rapport (Hemery 2024).

De par son abondance, et la disponibilité en données, l'aigle royal était donc le meilleur modèle possible pour concevoir un modèle générique de prédiction du risque de collision en 3D, dont la démarche de conception pourrait ensuite être adaptée ultérieurement à la prévision du risque pour des espèces plus rares, sensibles, ou moins documentées (p. ex. Aigle de Bonelli (*Aquila fasciata*), Pygargue à queue blanche (*Haliaeetus albicilla*), milan royal (*Milvus milvus*)).

2.2. Phase préliminaire : étude de la période d'apprentissages des jeunes aigles royaux

Le jeu de données « aigle royal » sur lequel reposait ce projet était composé de 343 individus et constitué d'environ 15 % d'individus cantonnés sur un territoire, d'environ 44 % d'individus juvéniles en apprentissages sur le territoire de leurs parents, et d'environ 41 % d'individus immatures ayant quitté leur territoire de naissance mais ne s'étant pas encore cantonnés sur un territoire leur permettant d'accéder à la reproduction. Chez l'aigle royal, comme chez beaucoup d'espèces d'oiseaux, il est plus difficile et plus risqué de capturer les adultes, que de capturer les juvéniles lorsque ces derniers sont encore au nid et donc peu mobiles (Ruaux et al. 2020), ce qui explique ce fort déséquilibre en faveur des juvéniles dans le jeu de données du modèle d'étude. Plusieurs de ces juvéniles ont par ailleurs été équipés sur des territoires où aucun individu adulte n'a été équipé. Pouvoir intégrer dans les modèles statistiques les données de suivis télémétriques de ces juvéniles au même titre que les données des adultes permet d'augmenter la couverture géographique et donc de diversifier les contextes paysagers disponibles dans le jeu de données (Guisan and Thuiller 2005). Cependant, ces juvéniles étant en pleine période d'apprentissages (appelée « PFDP » pour « *post-fledging dependence period* ») afin de perfectionner leurs techniques de vols ou de chasse, il n'était pas certain que leurs comportements soient représentatifs de ceux des individus ayant déjà acquis ces apprentissages. La première partie de ce projet était, de ce fait, consacrée à l'étude de cette PFDP, comme une étape préliminaire à la démarche de développement d'une méthode de prédiction du risque de collision. Cette étape permettait de déterminer à quel âge le comportement spatial des juvéniles était représentatif de celui de leurs parents, afin de pouvoir intégrer leurs données de suivis télémétriques dans les analyses statistiques globales. En effet, si les comportements spatiaux des juvéniles étaient différents de ceux de leurs parents pendant une période donnée, il pouvait être nécessaire de mettre de côté les données correspondant à la durée pendant laquelle ces comportements différaient. Dans l'hypothèse où les comportements spatiaux des juvéniles et des adultes auraient été complètement différents, il aurait alors fallu considérer ces juvéniles comme une classe d'âge à part, dans une analyse séparée, car ils présentaient peut-être plus de risque de collision avec les infrastructures aériennes du fait de leur inexpérience.

2.3. Développement d'une méthode de sélection d'habitats en trois dimensions

La seconde partie de ce projet était consacrée au développement d'une méthode permettant de prédire les zones à risque de collision pour les grands rapaces avec les infrastructures aériennes, en prenant en compte le fait qu'ils se déplacent en trois dimensions dans l'espace aérien. Cette méthode reposait sur le concept de sélection d'habitats (Manly et al. 2002, Hirzel et al. 2006), car elle avait pour objectif de mettre en évidence, pour chaque espèce cible, les secteurs d'intérêts où l'implantation de nouvelles infrastructures serait à éviter car l'espèce les fréquente de manière privilégiée. Chaque individu identifie et sélectionne les secteurs présentant les ressources (alimentaires, abris) lui fournissant les meilleures chances de survie ou de reproduction, ces ressources étant toutefois spécifiques à chaque espèce (Garshelis 2000, Morrison et al. 2006). Au sein de l'aire de répartition d'une espèce, les préférences individuelles peuvent varier du fait de la disponibilité ou non de certaines ressources, mais l'ensemble des ressources nécessaires pour qu'un secteur fournisse un habitat adéquat reste dans l'ensemble homogène au sein d'une même espèce (Krausman and Cain 2022). Les individus vont donc chercher à sélectionner les habitats regroupant les conditions qui leur sont favorables et à éviter ceux qui le sont moins (Manly et al. 2002).

Les analyses de sélection d'habitats permettent de mettre en évidence ces habitats qui vont être utilisés préférentiellement par les individus d'une même espèce parmi tous les habitats à leur disposition (Manly et al. 2002, Buskirk and Millsap 2006). Parmi les méthodes statistiques disponibles pour étudier la sélection d'habitats d'une espèce, la méthode des « *step-selection function* » est particulièrement adaptée aux données de trajectométrie (suivis télémétriques à fréquence suffisamment élevée pour décrire les trajets effectués par l'animal). En effet, elle a été développée pour prendre en compte les spécificités de ce type de données telles que les autocorrélations spatiales et temporelles (Thurfjell et al. 2014, Duchesne et al. 2015). L'autocorrélation est le fait que deux points rapprochés, dans le temps et/ou dans l'espace, ne soient pas indépendants du fait de cette proximité, ce qui peut alors induire des biais dans les estimations des paramètres de sélection d'habitats (Dale and Fortin 2002, Fortin et al. 2005). Cependant, cette méthode a été développée pour l'étude d'espèces animales se déplaçant sur un plan 2D (par exemple des mammifères se déplaçant au niveau du sol) (Thurfjell et al. 2014, Duchesne et al. 2015), même si certains auteurs l'ont employée pour étudier la sélection d'habitats d'espèces volantes, sans alors tenir compte de la troisième dimension dans laquelle elles évoluent (e.g. Aben et al. 2021, Frankish et al. 2022,

Cervantes et al. 2023). Nous avons donc adapté et développé une méthode de « *step-selection function* » en trois dimensions afin de faire le lien entre la hauteur de vol et la sélection d'habitats, lors des déplacements des aigles royaux. Cette méthode a ensuite permis de prédire les secteurs où les habitats étaient favorables à des vols à basse altitude, pour pouvoir les cartographier et visualiser les zones à risque de collision pour les aigles royaux avec les infrastructures aériennes.

2.4. Courants thermiques et orographiques : des variables décrivant l'espace aérien utilisé par les oiseaux planeurs

Les grands oiseaux planeurs, tels que l'aigle royal, pratiquent souvent le vol plané, ce qui les conduit fréquemment à se déplacer à la même hauteur que les infrastructures aériennes (Pennycuik 2008, Lovette and Fitzpatrick 2016). Ce vol plané est avantageux car il permet d'économiser de l'énergie par rapport au vol battu, mais également de parcourir de longues distances ou de gagner de l'altitude à moindre coût (Sparr et al. 2000, Shepard et al. 2016). Pour cela, les oiseaux planeurs utilisent notamment les courants aériens tels que les thermiques et les orographiques. Les courants ascendants thermiques naissent d'une différence de réchauffement de la surface du sol (par exemple, une clairière se réchauffe plus rapidement que la forêt qui l'entoure). La différence de température de l'air engendre alors une cellule de convection et l'air chaud s'élève, créant ainsi une ascendance. Les courants orographiques naissent, quant à eux, d'une combinaison entre vent et relief : lorsque le vent arrive face à un relief, il remonte la pente et crée une ascendance à son sommet. À l'inverse, quand le vent descend la pente, il entraîne la masse d'air avec lui et crée un courant orographique descendant, situation que les planeurs vont chercher à éviter pour rester en l'air le plus longtemps possible (Aupetit 2020, Martens 2021).

Ces courants aériens sont importants à prendre en compte lors de l'étude du déplacement d'un oiseau planeur, mais aucune variable n'était disponible pour les décrire, en France, au début du projet, ce qui nous a obligé à les reconstruire. Pour cela, nous avons utilisé une méthode proposée par Bohrer et al. (2012) à partir de données de relief (statiques dans le temps) et de données météorologiques, fournies par Météo France au pas de temps horaire tous les jours pendant cinq ans. Cette résolution temporelle n'était pas adaptée à la question de ce projet, pour laquelle il était nécessaire de disposer d'une variable synthétique et statique, afin de traduire le potentiel d'un secteur à déclencher des courants aériens. Nous avons donc construit des variables synthétiques décrivant le potentiel annuel de thermiques et d'orographiques spatialisées. Pour plus de précisions sur la méthode employée et les données utilisées, se référer au manuscrit de thèse d'A. Hemery.

Nous avons ainsi obtenu trois variables, à l'échelle de la France entière, décrivant les secteurs potentiels pour déclencher des courants aériens susceptibles d'être utilisés par les oiseaux planeurs. Ces variables présentent une hétérogénéité spatiale (Figure 1), montrant des zones favorables à la création de ces courants, ainsi que d'autres secteurs, à l'inverse, défavorables à la genèse de ces courants. Les variables ainsi reconstruites sont disponibles à la consultation et au téléchargement, en libre accès sous licence Etalab, sur le site internet du présent projet (<https://risk4draptors.cefe.cnrs.fr>).

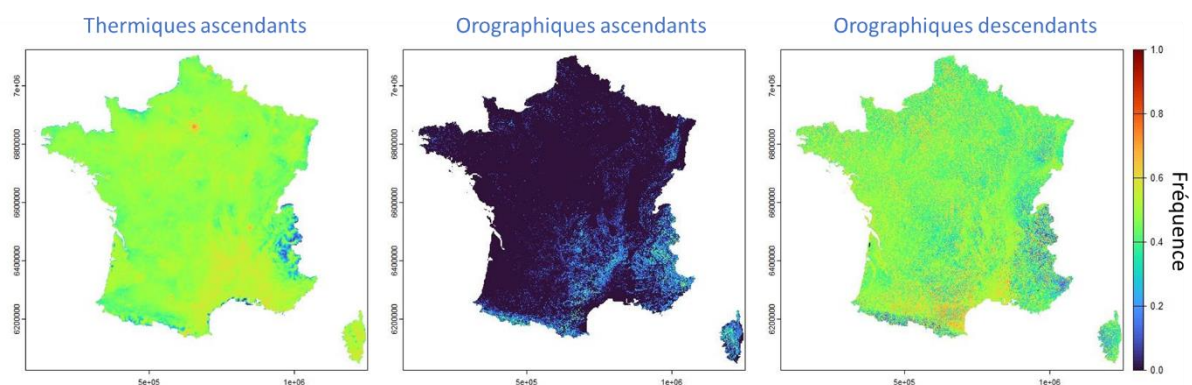


Figure 1 : Exemples de cartes de courants ascendants thermiques (à gauche) et de courants orographiques ascendants (au centre) et descendants (à droite) susceptibles d'être utilisés par un aigle royal. L'échelle de couleur représente le pourcentage de temps (exprimé en fréquence de 0 à 1) où les courants sont suffisamment puissants pour être utilisés par un aigle royal.

3. Bilan / Principaux résultats obtenus

3.1. Période d'apprentissages des jeunes aigles royaux

L'objectif de la première phase du travail était de vérifier l'homologie des suivis télémétriques des jeunes rapaces pendant leur phase d'apprentissages vis-à-vis de ceux des adultes, afin de caractériser l'utilisation de l'espace et de l'habitat naturel par les adultes, en utilisant les données des juvéniles en absence de données d'adultes. Ces vérifications ont été faites à partir des suivis télémétriques du modèle d'étude, l'aigle royal.

Dans un premier temps, nous avons cherché à savoir si les jeunes aigles royaux quittaient leur territoire de naissance à partir du moment où leur maîtrise du vol était établie, ou si cet apprentissage était rapide et qu'ils restaient auprès de leurs parents pour d'autres raisons. Ces résultats ont montré que, pour les sept métriques utilisées pour décrire les performances de vol, l'amélioration se faisait au cours des deux premiers mois, alors que ces jeunes aigles royaux restent en moyenne six mois sur leur territoire de naissance avant de partir en erratisme. La cinétique de cette amélioration était par ailleurs indépendante du sexe du juvénile, tout comme de sa stratégie de dispersion (précoce ou tardive). Ces résultats étaient en accord avec la littérature qui montre que, chez plusieurs espèces de rapaces, les performances de vol des jeunes s'améliorent rapidement après le départ du nid. Les jeunes aigles royaux restent ensuite plusieurs semaines, voire plusieurs mois, sur le territoire de leurs parents avant de partir en erratisme. Plusieurs hypothèses peuvent expliquer cette cohabitation avec les parents : à l'automne, les conditions météorologiques deviennent plus rudes et il peut être difficile pour un jeune de prendre alors son indépendance ; en restant sur son territoire de naissance, le jeune peut continuer de se nourrir sur les proies chassées par ses parents et également prolonger le perfectionnement des techniques de chasse ; enfin, les parents peuvent faire preuve de tolérance envers leur progéniture car cela favorise la survie de leur descendance et donc leur propre succès reproducteur. Les résultats de ce travail ont été publiés dans *Journal of Avian Biology* 2023 (7-8), e03111 (DOI : <https://doi.org/10.1111/jav.03111>).

Dans un second temps, nous avons examiné les suivis télémétriques de binômes « jeune - adulte » équipés sur le même territoire, afin d'évaluer la possibilité d'utiliser les suivis des jeunes en substitution de ceux des adultes dans des secteurs où leur équipement fait défaut. Ces résultats ont montré que, pour l'intégralité du domaine vital, l'utilisation de l'espace et des habitats (occupation du sol comme topographie) était très similaire entre adultes et jeunes. Cette similarité était indépendante de la durée d'apprentissages du jeune ; en d'autres termes les jeunes partant avant la moyenne des six mois ont le temps de parcourir et d'explorer l'intégralité du territoire de leurs parents. En termes d'utilisation de l'espace, la similarité était plus faible pour le cœur de domaine vital que pour son intégralité. Cette différence était probablement due au fait que le cœur de domaine vital du jeune est concentré autour de son nid de naissance, alors que celui des adultes regroupe tous les nids qu'ils utilisent en alternance. Le cœur de domaine vital du jeune restait malgré tout représentatif de celui d'un adulte mais dans une moindre mesure que pour l'intégralité du domaine vital. Nos analyses ont également montré que la similarité augmentait au cours des deux premiers mois après l'envol, en accord avec les résultats précédents, avec des valeurs de départ faibles en termes d'utilisation de l'espace, pour atteindre ensuite un plateau à partir du troisième mois. Les premiers temps, les jeunes aigles royaux restent dans la proximité immédiate de leur nid, pour ensuite explorer progressivement le territoire de leurs parents. L'augmentation de cette similarité est synchronisée avec l'amélioration des performances de vol décrite précédemment. Ce travail a été publié dans *Journal of Avian Biology* 2024 (7-8), e03212 (DOI : <https://doi.org/10.1111/jav.03212>).

Cette étape a permis de valider l'utilisation des suivis télémétriques de jeunes aigles royaux en période d'apprentissage, après une sélection préalable appliquée à leurs données afin de retirer les deux premiers mois après l'envol, où leurs déplacements n'étaient pas représentatifs de ceux des adultes (Figure 2). Cela a permis, pour les secteurs où des adultes n'ont pas pu être équipés, d'intégrer leurs données dans les modèles statistiques au même titre que celles des adultes. Dans le cas d'une autre espèce, il est possible que la période d'amélioration des performances de vol soit d'une durée différente ou que le départ du territoire de naissance coïncide avec la fin d'acquisition de ces performances, comme par exemple pour l'aigle de Bonelli dont les jeunes quittent très tôt le territoire des parents. Dans ce cas, les données de suivis télémétriques des jeunes pendant leur période d'apprentissage sur le territoire des adultes ne pourraient pas être utilisées au même titre que celles des adultes. De même, il est nécessaire de vérifier la similarité entre jeunes et adultes dans l'utilisation de l'espace et des habitats, ainsi que sa cinétique. Ces deux conditions sont nécessaires pour intégrer les données de suivis télémétriques de juvéniles dans la démarche présentée dans ce projet.

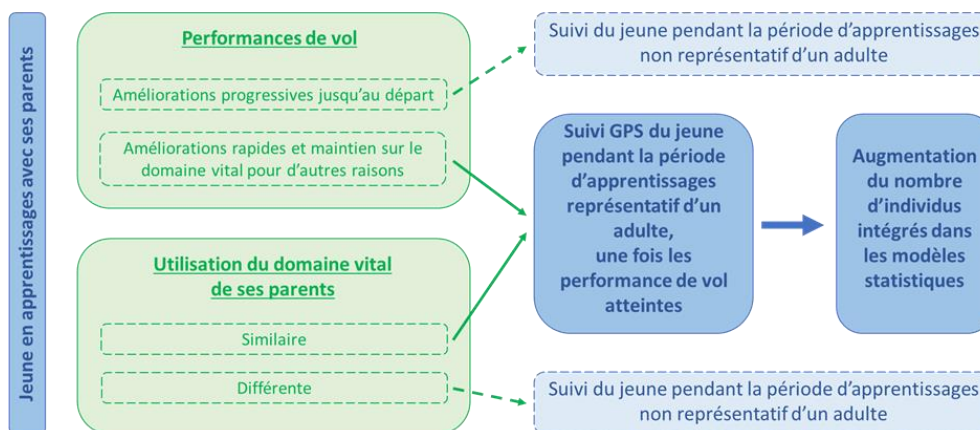


Figure 2 : Schéma récapitulatif des étapes préliminaires de la démarche Risk4DRaptors, quant à la possibilité d'utiliser ou non les données de suivis télémétriques de jeunes accipitridés pendant leur phase d'apprentissages avec leurs parents.

3.2. Sélection d'habitats en trois dimensions par les aigles royaux et risque de collisions

3.2.1. Résumé de la méthode développée et des résultats obtenus pour les aigles royaux

Pour étudier la sélection d'habitats en 3D des aigles royaux, nous avons adapté une méthode initialement développée en 2D : la méthode intégrée de sélection par étapes (« *integrated step-selection function* »). Cette méthode décompose un trajet en étapes réalisées, dont on mesure la longueur de chaque étape (aussi appelée « pas ») et l'angle de rotation entre les segments des étapes (Thurfjell et al. 2014, Duchesne et al. 2015). On compare ensuite l'habitat à chaque pas réalisé, avec celui au niveau de pas générés de manière aléatoire à partir du point de départ de chaque pas. Pour étendre cette méthode en 3D, nous avons d'abord décrit les trajets en 3D, avec un angle de rotation décomposé entre un angle horizontal et un angle vertical, puis la longueur de chaque pas a été calculée en 3D (et non plus selon sa projection en 2D). Enfin, pour chaque pas, la hauteur de vol du point d'arrivée a été calculée en soustrayant l'altitude du sol à celle mesurée par le GPS de l'oiseau (Figure 3). Nous avons ensuite généré les pas aléatoires en 3D, en ajoutant une procédure pour supprimer les pas générés artificiellement sous terre et ne conserver que ceux qui étaient biologiquement réalisable par un oiseau (Hemery et al. In prep).

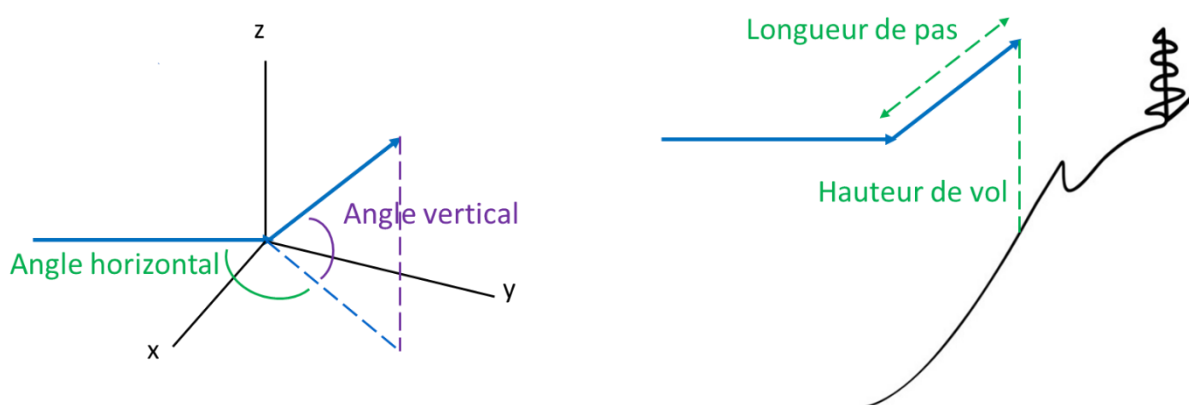


Figure 3 : Schéma de décomposition d'un trajet en 3D (en bleu). A gauche : distinction entre angle horizontal et angle vertical. A droite : hauteur de vol et longueur de pas, calculées en 3D.

Une fois la méthode développée, nous avons donc pu étudier la sélection d'habitats des aigles royaux en vol, en intégrant des variables décrivant des habitats pouvant influencer la hauteur de vol, à savoir l'occupation du sol, la topographie et les courants aériens tels que les ascendances thermiques et orographiques. Pour plus de précisions sur les variables d'habitats utilisées, se référer au manuscrit de thèse d'A. Hemery. L'aboutissement de la procédure a consisté à produire des cartes de prédiction des zones favorables au vol d'un aigle sous une hauteur déterminée, hauteurs qui peuvent être choisies

à postériori selon l'infrastructure aérienne d'intérêt. Ces zones favorables au vol peuvent alors être interprétées comme des zones à risque de collision, si des infrastructures de hauteur à risque y sont présentes.

Cependant, les méthodes de sélection d'habitats de type « *step-selection function* » ne permettent pas d'obtenir comme résultat une probabilité absolue. Elles estiment en effet une probabilité relative et permettent donc de déterminer qu'un secteur sera plus sélectionné que le secteur voisin. Avec la méthode proposée ici, nous n'obtenons donc pas une probabilité absolue de voler sous telle hauteur à risque, mais une probabilité relative. Pour un secteur donné, nous pouvons alors savoir s'il présente ou non un risque de collision plus élevé que les secteurs voisins, ce qui peut aider pour la planification à large échelle, mais aussi à faire du « *micro-siting* », c'est-à-dire choisir au mieux l'emplacement de l'infrastructure à implanter afin de minimiser autant que possible le risque de collision.

Grâce à cette méthode, nous avons pu produire des cartes de prédiction des secteurs sélectionnés par les aigles royaux, selon leur hauteur de vol. La Figure 4-A montre les résultats obtenus pour tous les vols inférieurs ou égaux à 250 m du sol, à l'échelle nationale. Cette carte peut se lire comme une carte de prédiction des zones à risque relatif de collision avec des infrastructures aériennes qui feraient 250 m de haut. En zoomant sur une petite zone (Figure 4-B), on peut voir que certains secteurs présentent plus de risque que d'autres, mais il est plus difficile de se prononcer pour d'autres secteurs où le contraste dans le gradient de couleurs n'est pas très marqué. Si on décide de construire une infrastructure dans cette zone, comme la méthode proposée ici fournit un risque relatif, le gradient de couleurs peut être recalculé pour mieux visualiser les contrastes et mieux cibler les secteurs à moindre risque à l'échelle locale (Figure 4-C).

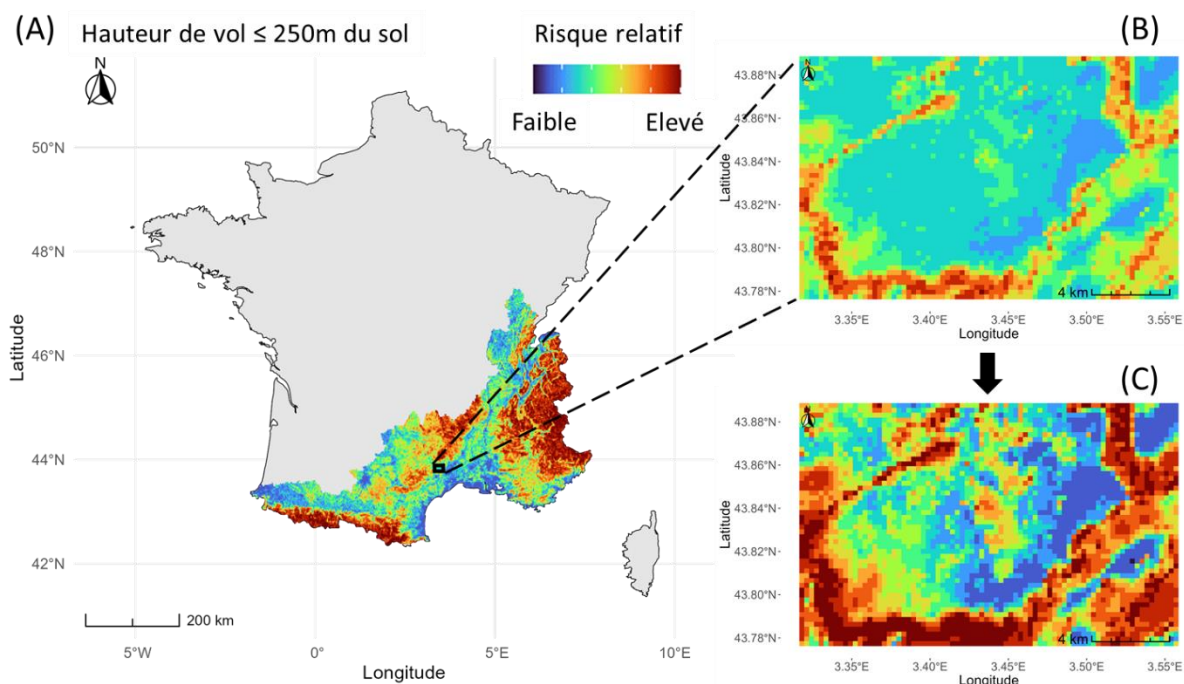


Figure 4 : (A) Carte de prédiction à l'échelle nationale, générée pour des hauteurs de vol inférieures ou égales à 250 m du sol sur l'aire de répartition française de l'aigle royal. (B) Zoom sur une petite zone exemple. (C) Même petite zone, mais avec le gradient de couleur recalculé sur l'emprise de cette zone pour mieux visualiser le risque relatif et accentuer le contraste entre les zones à faible risque et les zones à fort risque de collision pour les aigles royaux avec des infrastructures aériennes de 250 m de hauteur.

3.2.2.Exemple d'application des résultats de risque de collision des aigles royaux avec les infrastructures aériennes

Après avoir développé la méthode de sélection d'habitat en 3D et ainsi pu produire des cartes de prédiction du risque de collisions pour les aigles royaux avec des infrastructures aériennes, nous avons regardé plus précisément ces résultats sur un secteur avec à la fois plusieurs territoires d'aigles (n=10) et une forte densité d'éoliennes (n=243). Ce secteur se situe entre Montpellier et Millau, et deux mortalités par collision d'aigles suivies par télémétrie y ont été recensées ces dernières années.

La carte de la Figure 5-(A) montre que la plupart des éoliennes ont été implantées dans des zones où le risque relatif qu'un aigle vole en dessous de 250 m est élevé. Pour mieux le quantifier, nous avons étudié la distribution des valeurs de risque. Le graphique de la Figure 5-(B) représente cette distribution pour l'intégralité des pixels de la carte la Figure 5-(A). 70

% des pixels de cette carte sont à gauche de la ligne noire en pointillés (risque faible à modéré), et 30 % des pixels sont à droite de cette ligne, présentant ainsi le risque le plus fort de cette zone. Le graphique de la Figure 5-(C) représente cette distribution pour l'intégralité des éoliennes implantées dans cette zone. Nous pouvons constater que seulement 35 % d'entre elles sont à gauche de la ligne noire en pointillés (risque relatif faible à modéré) et 65 % des éoliennes ont été implantées dans les secteurs présentant un risque relatif élevé de collision. De plus, environ 7 % d'entre elles présentent un risque relatif très élevé (à droite de la ligne rouge en pointillés).

Les cartes proposées ici ne permettent donc pas uniquement de visualiser les secteurs où il ne faudrait pas implanter des infrastructures aériennes, mais également de mettre en évidence celles dont l'emplacement est particulièrement risqué vis-à-vis des aigles royaux. Cela peut aider à cibler les infrastructures aériennes à traiter en priorité dans des programmes de réduction du risque de collision. Cet exemple a été appliqué à des éoliennes car le projet Risk4DRaptors fait partie du programme MAPE s'intéressant spécifiquement au développement de l'éolien, mais les résultats que nous proposons ici peuvent également être utiles pour des lignes électriques ou d'autres câbles aériens, en choisissant la bonne hauteur à risque, et ainsi visualiser les portions qui pourraient être neutralisées si elles présentent un risque élevé de collision avec les aigles royaux.

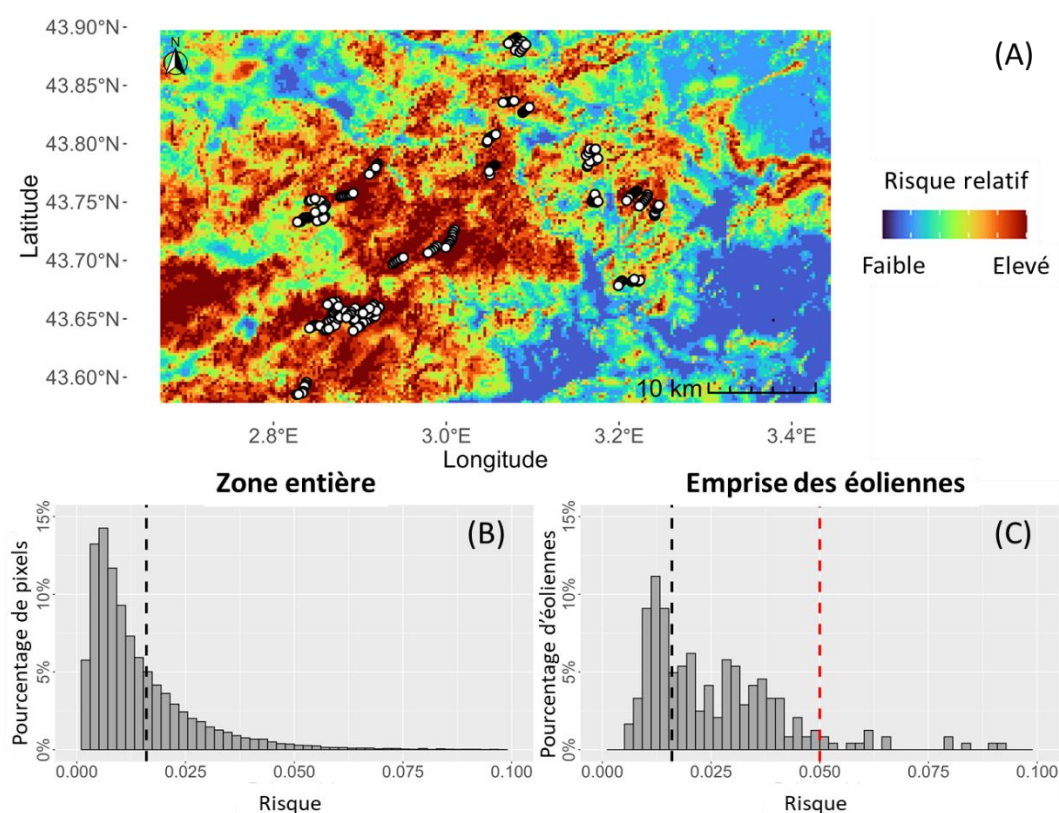


Figure 5 : (A) Carte de prédiction générée pour des hauteurs de vol inférieures ou égales à 250 m du sol sur un secteur du Sud de la France où sont implantées plusieurs éoliennes ($n=243$, points blancs) et où deux aigles royaux suivis par télémétrie sont morts à la suite d'une collision avec une éolienne ces dernières années. Le gradient de couleur a été ajusté à l'étendue de cette zone, permettant de mieux visualiser les contrastes entre zones à faible risque et zones à risque élevé. (B) Histogramme des valeurs du risque relatif pour tous les pixels de la carte (A). 70 % des pixels de la zone sont à gauche de la ligne noire en pointillés. (C) Histogramme des valeurs de risque relatif extraites pour les positions de toutes les éoliennes présentes sur la carte (A), avec la même échelle en abscisses que (B). La ligne noire en pointillés est la même qu'en (B), matérialisant le seuil au-delà duquel on trouve 65 % des éolienne. La ligne rouge en pointillés matérialise le seuil au-delà duquel on trouve 7 % d'éoliennes présentant le risque le plus élevé.

3.3. Conditions pour répliquer la méthode à d'autres espèces

Cette démarche a été mise au point et testée à partir d'une espèce bien documentée, l'aigle royal, permettant de faire la preuve de la pertinence et la faisabilité du concept. Cependant cette méthode a été pensée dès le début pour être applicable à d'autres espèces. En théorie, les modélisations de risque de collision obtenues pour une espèce ne sont valables que pour cette espèce, chacune ayant sa propre écologie. Pour produire ces cartes de prédiction du risque de collision pour d'autres espèces, il est de ce fait nécessaire de disposer de données remplissant plusieurs conditions précises (voir ci-dessous). Cette réplification a donc été testée pour une autre espèce pour laquelle nous disposions d'une grande quantité de données

télémétriques : le vautour fauve. Les résultats obtenus pour cette espèce sont disponibles dans le manuscrit de thèse d'A. Hemery. A partir de cette application au vautour fauve, les conditions et étapes nécessaires pour adapter la démarche à une autre espèce sont présentées ci-dessous.

La première condition est de disposer d'un nombre suffisant d'individus équipés de balises télémétriques mesurant leur hauteur de vol associée à chaque localisation, avec une distribution spatiale représentative de l'aire de répartition de l'espèce. Pour les vautours fauves, nous disposons de 79 individus répartis sur six zones de reproduction (deux populations dans les Pyrénées, une dans le Massif Central et trois dans les Alpes), tous équipés d'une balise télémétrique Ornitela mesurant la hauteur de vol. Si le jeu de données comprend des individus juvéniles, comme montré dans la phase préliminaire de ce projet, une première étape va donc consister à vérifier si les suivis télémétriques de ces juvéniles peuvent être intégrés dans la démarche. Pour les vautours fauves juvéniles, nous avons retiré toutes les données correspondant au premier mois post-envol car les travaux de Harel et al. (2016a) ont montré une différence entre les comportements des jeunes et des adultes pendant les premières semaines après l'envol.

Ensuite, il faut s'assurer de disposer d'un nombre suffisant de données de localisations 3D par individu (voir plus bas), compatibles avec la méthode des « *step-selection function* ». En effet, cette méthode étant basée sur la décomposition des trajectoires en pas d'intervalle de temps régulier et constant, il est nécessaire que la programmation utilisée pour le suivi télémétrique permette d'obtenir suffisamment de pas réguliers, pour l'intervalle de temps retenu. Par exemple, pour l'aigle royal, nous avons choisi un intervalle de 5 minutes entre chaque localisation d'une trajectoire mais pour le vautour fauve nous avons dû passer à un intervalle de 10 minutes. L'intervalle de temps entre chaque pas doit être « constant » c'est-à-dire le même pour tous les individus du jeu de données. Cet intervalle doit également rester le même tout au long de l'année car la sélection d'habitats peut varier d'une saison à l'autre, et il est important de garder le même volume de localisations par saison, pour ne pas donner plus de poids aux données de l'été dans les prédictions du modèle par rapport à celles de l'hiver par exemple. Or, les programmations des balises télémétriques sont souvent liées aux capacités de charge des batteries des balises, dont la recharge se fait par panneau solaire et est souvent moins efficace en hiver qu'en été. Il n'est donc pas rare que les intervalles de temps entre deux localisations soient plus larges en hiver qu'en été. Par exemple, pour les vautours fauves, certaines balises ont une programmation avec intervalles de 5 minutes en été mais jusqu'à 30 minutes ou plus en hiver. Utiliser un intervalle de 10 minutes résulte d'un compromis qui nous a permis de conserver davantage d'individus avec un suivi sur quatre saisons dans les différents massifs, qu'avec le seuil à 5 minutes. Lors de la mise au point de la méthode, nous avons testé plusieurs volumes de données pour déterminer le nombre de pas minimum nécessaire pour obtenir des résultats stabilisés. Entre 900 et 1200 pas par saison et par individu, les résultats étaient stabilisés. Il est donc nécessaire de disposer d'environ 1000 pas d'intervalle de temps régulier et constant par saison et par individu.

L'étape suivante est liée à l'écologie de l'espèce retenue. L'aigle royal est une espèce territoriale, chez qui les juvéniles restent plusieurs mois en apprentissages sur leur territoire de naissance, avant de partir en erratisme en quête d'un nouveau territoire où se cantonner. Nous avons donc séparé le jeu de données en deux catégories, basées sur les comportements spatiaux : les individus territoriaux (individus cantonnés + juvéniles en apprentissages) pratiquant plutôt des trajets de courtes distances à l'échelle du territoire, et les individus erratiques parcourant de longues distances à l'échelle de l'aire de répartition de l'espèce. Le vautour fauve, quant à lui, est une espèce grégaire et coloniale, mais dont les individus qui ne se reproduisent pas (ou parfois ayant échoué dans leur reproduction) peuvent avoir des périodes d'erratisme. Cet erratisme peut également se produire en dehors de la période de reproduction pour tous les individus (Delgado-González et al. 2022). Au cours de son suivi télémétrique, un vautour peut donc alterner des périodes durant lesquelles il va restreindre ses déplacements au domaine vital de la colonie, avec des périodes durant lesquelles il va parcourir de longues distances. Pour le vautour fauve, la séparation du jeu de données en catégories basées sur les comportements spatiaux n'a de ce fait pas pu se faire à partir des dates de départ en erratisme et/ou dates de cantonnement, comme pour l'aigle royal. Une méthode de segmentation a donc été utilisée pour isoler les périodes durant lesquelles les vautours fauves se trouvaient dans le domaine vital de leur population reproductrice au sein d'un massif, des périodes durant lesquelles ils effectuaient des déplacements hors de cette zone. Chez cette espèce, un domaine vital populationnel a une superficie variant entre 10 000 et 30 000 km² (Fluhr et al. 2021). Cette distinction entre déplacements locaux et déplacements à large échelle est nécessaire car les individus ne vont alors pas fréquenter les mêmes habitats, ni voler à la même hauteur, ce qui influencera nécessairement les résultats des analyses de sélection d'habitats (Harel et al. 2016b) (Figure 6).

Par ailleurs, dans le cas d'une espèce dont les suivis télémétriques n'auraient pas encore été initiés, ou pour laquelle des équipements supplémentaires seraient nécessaires dans plusieurs secteurs de son aire de répartition, il est nécessaire de réfléchir en amont au plan d'échantillonnage afin de couvrir au maximum le gradient de diversité des habitats fréquentés par l'espèce. La méthode de caractérisation des territoires proposée en annexe 7 du manuscrit de thèse d'A. Hemery peut permettre de sélectionner facilement les secteurs intéressants où équiper de nouveaux individus, car elle a permis, malgré une méthode *ad hoc* de mettre en évidence des gradients de diversité dans la composition en habitats des territoires des aigles royaux, et ainsi de faire ressortir des similarités et des dissimilarités parmi les territoires de l'espèce.

Enfin, lors de la recherche des paramètres environnementaux à intégrer dans la procédure de sélection d'habitats, nous avons opté pour des variables génériques (par exemple en regroupant les 23 catégories de la base OSO d'occupation du sol

en seulement six variables distinctes, correspondant ainsi aux grands ensembles paysagers tels que les forêts ou les zones urbanisées). En procédant ainsi, les variables d'habitats sont déjà disponibles et peuvent alors être utilisées pour modéliser la sélection d'habitats d'espèces différentes.

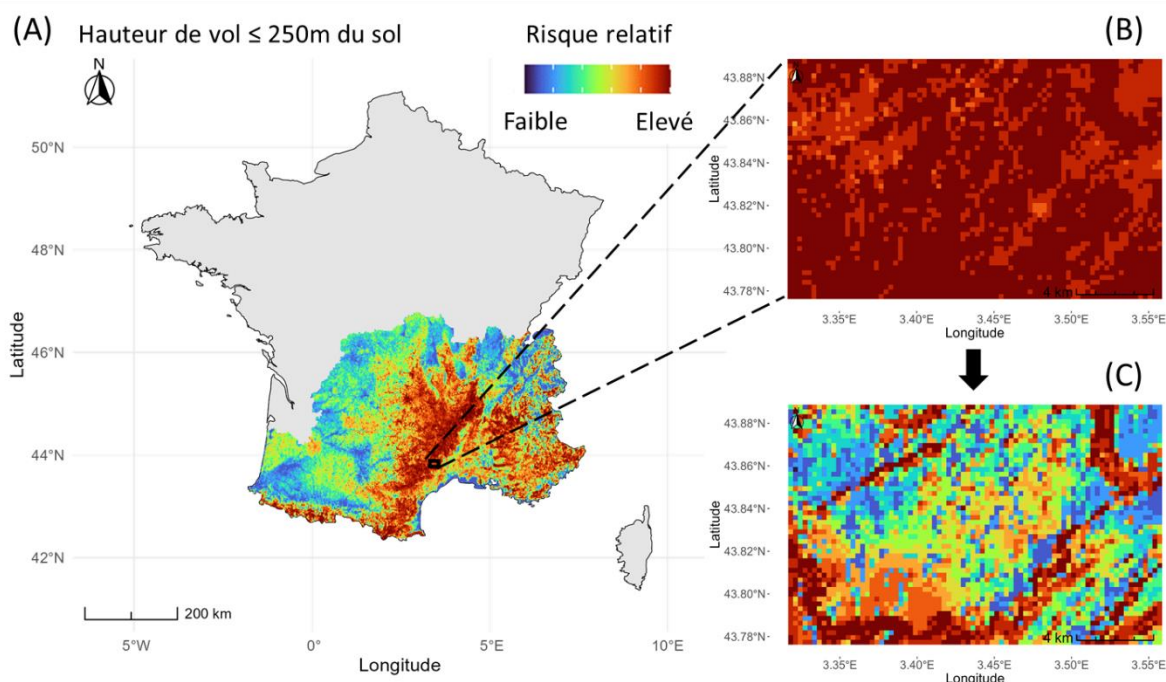


Figure 6 : (A) Carte de prédiction à l'échelle nationale, générée pour des hauteurs de vol inférieures ou égales à 250 m du sol sur l'aire de répartition française du vautour fauve. (B) Zoom sur une petite zone exemple. (C) Même petite zone, mais avec le gradient de couleur recalculé sur l'emprise de cette zone pour mieux visualiser le risque relatif et accentuer le contraste entre les zones à faible risque et les zones à fort risque de collision pour les vautours fauves avec des infrastructures aériennes de 250 m de hauteur.

3.4. Outil développé et améliorations possibles

Un site internet (<https://risk4draptors.cefe.cnrs.fr>) permet de visualiser et d'utiliser les cartes de zones à risque de collision produites pour l'aigle royal et le vautour fauve, à partir de la démarche élaborée dans ce projet. La résolution spatiale de ces cartes est de 250 m x 250 m, ce qui est compatible à la fois avec l'écologie des grands rapaces et leurs déplacements, et la précision nécessaire pour les projets d'aménagement et la planification des implantations d'infrastructures aériennes. Nous avons produit ces cartes pour des hauteurs de vol allant de 10 m du sol à 300 m du sol, mais la méthode permet de les générer pour des hauteurs de vol allant au-delà des 300m, si cela était nécessaire et en contactant les porteurs du présent projet. Par ailleurs, ce site est en accès libre, pour une consultation par les services de l'Etat, les bureaux d'études ou encore les opérateurs et aménageurs d'infrastructures aériennes. Ces cartes ont été conçues pour servir d'outil d'aide à l'évitement, afin de sélectionner au mieux les secteurs où implanter des futures infrastructures aériennes en fonction de l'espèce de rapace la plus à risque localement. Elles peuvent également servir d'outil d'aide à la réduction, afin de mettre en évidence les infrastructures aériennes dont l'emplacement serait particulièrement à risque vis-à-vis des grands planeurs. Cet outil peut ainsi aider à cibler les infrastructures à traiter en priorité dans des programmes de réduction du risque de collision.

Cette application web propose deux échelles de visualisation du risque de collision : une échelle nationale et une échelle locale. L'échelle nationale (Figure 7) permet de visualiser les secteurs les plus à risque (et respectivement les moins à risque) sur l'ensemble de l'aire de répartition française de l'espèce d'intérêt, et peut être utilisée par exemple pour de la planification. L'échelle locale (Figure 8) permet, quant à elle, de recalculer le gradient de couleur du risque relatif au niveau de l'emprise de la zone géographique sélectionnée par l'utilisateur, grâce à un programme informatique interactif. Cela permet de mieux afficher les contrastes et d'aider au micro-siting des infrastructures en visualisant à fine échelle (compatible avec l'écologie de l'espèce d'intérêt) les secteurs les plus à risque qu'il faudrait alors éviter (et respectivement les moins à risque qui pourraient ainsi être privilégiés) pour implanter de nouvelles infrastructures aériennes.

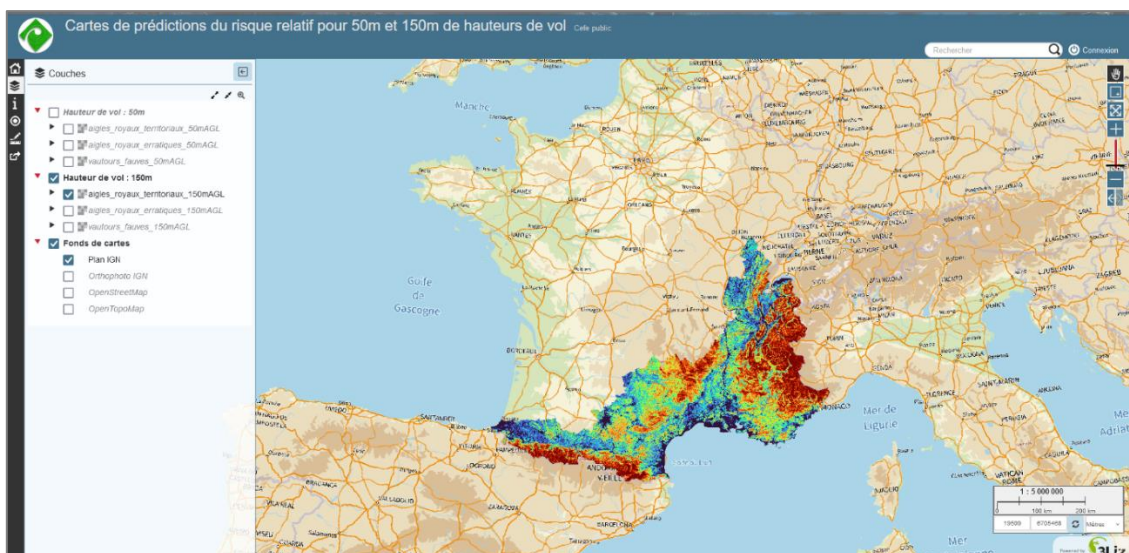


Figure 7 : Capture d'écran de l'outil d'affichage du risque relatif à l'échelle nationale.

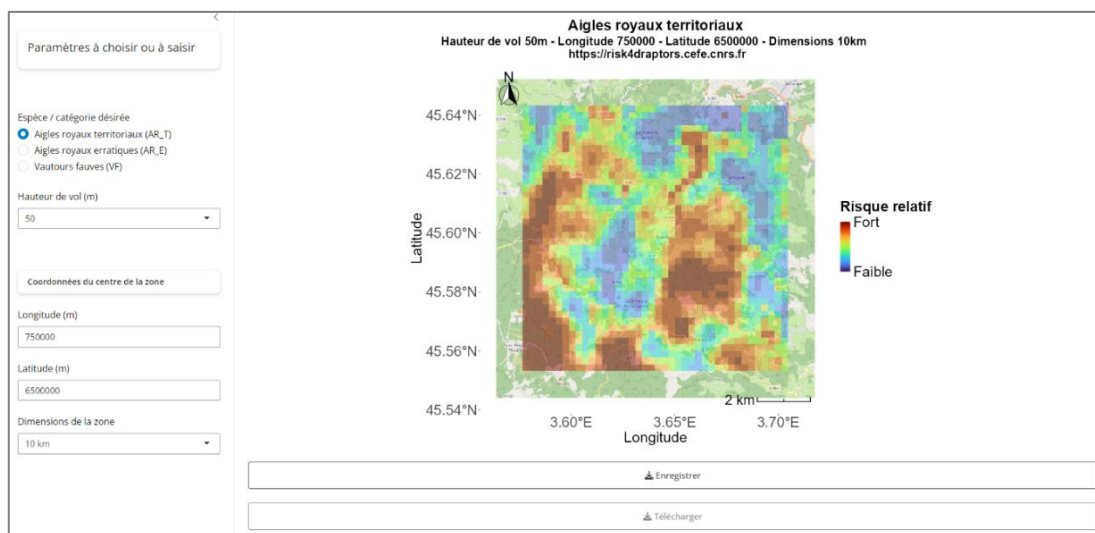


Figure 8 : Capture d'écran de l'outil de recalcul du gradient de couleurs du risque relatif à l'échelle locale.

Un atelier avec les acteurs de la problématique a été organisé le 16 janvier 2025 pour réfléchir ensemble à l'ergonomie et à l'amélioration de ce site internet, ainsi qu'à la définition de tutoriels à y associer afin d'aider à sa prise en main. Par ailleurs, les cartes produites sont également téléchargeables gratuitement, sous format raster, accompagnées d'une licence Etalab, afin d'être utilisées par les acteurs de la problématique dans leurs logiciels de SIG.

Enfin, les cartes de risque de collision sont accompagnées de cartes d'incertitude des prédictions du modèle. En effet, les prédictions issues d'un modèle viennent avec une incertitude d'estimation et peuvent ainsi être plus ou moins précises selon les secteurs (la précision peut être par exemple faible si les localisations GPS étaient insuffisantes pour certaines valeurs des paramètres environnementaux). Ces cartes d'incertitude permettent alors de mettre en évidence les secteurs géographiques où les prédictions du modèle sont moins fiables. Si des implantations d'infrastructures aériennes sont envisagées dans ces secteurs, il peut être, par exemple, nécessaire d'y équiper de nouveaux individus de balises télémétriques afin que leurs données puissent alimenter le modèle et améliorer sa qualité de prédiction.

4. Schéma récapitulatif

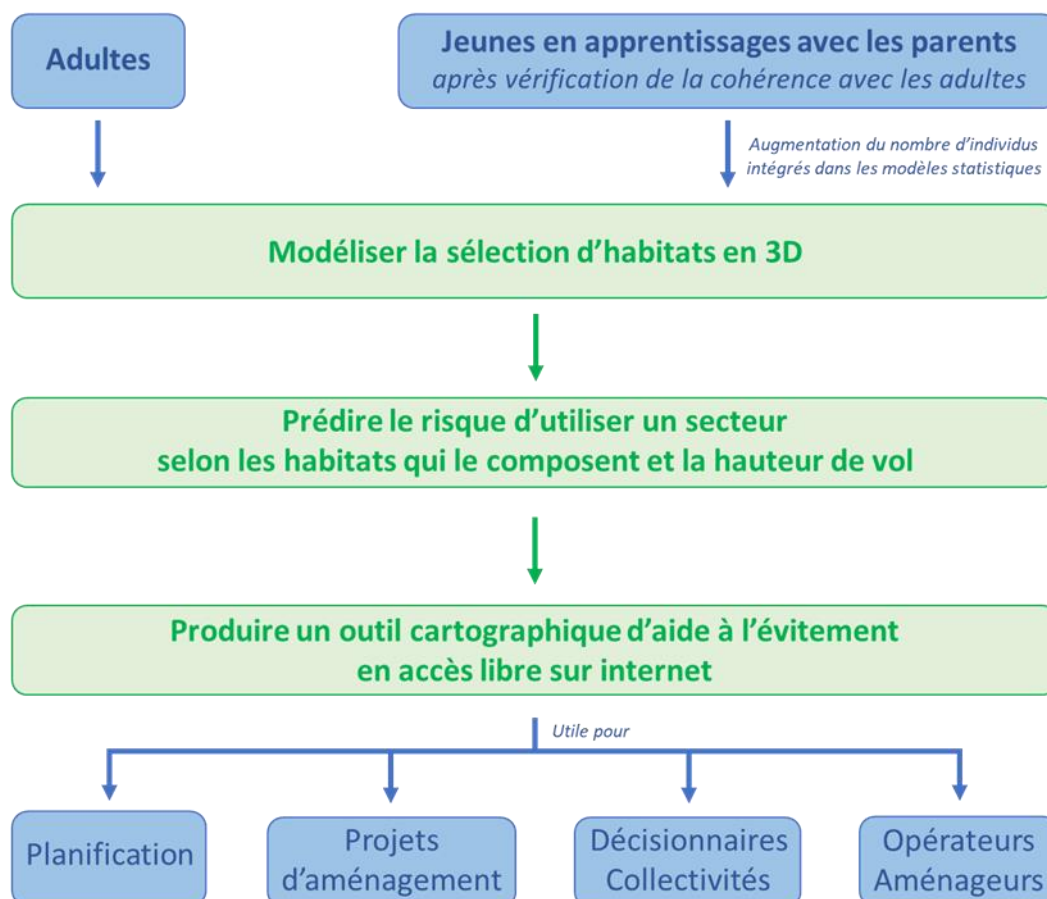


Figure 9 : Schéma récapitulatif de la démarche Risk4DRaptors.

5. Conclusion

Ce projet a montré qu'il était possible de prédire les zones où les grands rapaces sont le plus susceptibles d'entrer en collision avec des obstacles aériens tels que les éoliennes ou le réseau de transport d'électricité. Du fait de leurs modes de déplacement, mais aussi de leurs spécificités démographiques, ces grands planeurs font partie des espèces à enjeux de conservation qui sont à considérer dans les études d'impacts préalables aux implantations d'infrastructures aériennes, mais également pour l'établissement de la planification dans les politiques publiques en faveur du développement des énergies renouvelables. L'outil proposé par ce projet a donc été réfléchi pour servir à la fois à cette planification à large échelle, ainsi qu'au micro-siting des infrastructures à fine échelle.

La lutte contre le changement climatique ne doit pas se faire au détriment de la préservation de la biodiversité, mais au contraire en intégrant pleinement les problématiques pouvant conduire à une érosion de cette biodiversité. La démarche proposée ici a donc vocation à aider les décideurs, mais aussi les promoteurs et aménageurs, à mieux prendre en compte les questions de conservation et cohabitation avec les espèces de grands rapaces, qui partagent l'espace aérien avec les éoliennes et les réseaux électriques.

6. Valorisation du projet

Les résultats scientifiques obtenus au cours des différentes étapes de ce projet ont l'objet de publications scientifiques internationales ou sont en cours de préparation pour soumission à de telles revues :

- Arzhela Hemery, Lucas Mugnier-Lavorel, Christian Itty, Olivier Duriez, Aurélien Besnard. 2023. Timing of departure from natal areas by golden eagles is not constrained by acquisition of flight skills. *Journal of Avian Biology* 7-8, e03111 (DOI : <https://doi.org/10.1111/jav.03111>).
- Arzhela Hemery, Olivier Duriez, Christian Itty, Pierre-Yves Henry, Aurélien Besnard. 2024. Using juvenile movements as a proxy for adult habitat and space use in long-lived territorial species: a case study on the golden eagle. *Journal of Avian Biology* 7-8, e03212 (DOI : <https://doi.org/10.1111/jav.03212>).
- Arzhela Hemery, Olivier Duriez, Nicolas Courbin, Jacinthe Paradis, Capucine Grignard, Christian Itty, Pierre-Yves Henry, Marie Lothon, Aurélien Besnard. Three-dimensional habitat selection modeling can help in the positioning of aerial infrastructures to reduce the risk of collision with soaring birds. In prep.
- Arzhela Hemery, Nicolas Courbin, Aurélien Besnard, Pierre-Yves Henry, Olivier Duriez. Assessing accuracy and precision in the measurement of altitude by GPS transmitters before deployment on birds. In prep.

Par ailleurs, tout au long de ce projet, des séminaires se sont tenus avec les participants du projet MAPE regroupant différents acteurs du développement de la filière éolienne en France, afin de leur présenter l'avancée du projet mais également de réfléchir ensemble à la conception de l'outil de prédiction du risque. Certains résultats ont également été présentés lors des « journées aigle royal » organisées en 2022 par la Ligue de Protection des Oiseaux.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aben, J., Signer, J., Heiskanen, J., Pellikka, P. and Travis, J. M. J. 2021. What you see is where you go: visibility influences movement decisions of a forest bird navigating a three-dimensional-structured matrix. – *Biol. Lett.* 17: 1–6.
- Allen, A. M. and Singh, N. J. 2016. Linking movement ecology with wildlife management and conservation. – *Frontiers in Ecology and Evolution* 3: 1–13.
- Allison, T. D., Cochrane, J. F., Lonsdorf, E. and Sanders-Reed, C. 2017. A review of options for mitigating take of golden eagles at wind energy facilities. – *Journal of Raptor Research* 51: 319–333.
- Aupetit, H. 2020. Les visiteurs du ciel - Guide de l'air pour l'homme volant. – *Flying Pages Europe*.
- Barrios, L. and Rodríguez, A. 2004. Behavioural and environmental correlates of soaring-bird mortality at on-shore wind turbines. – *Journal of Applied Ecology* 41: 72–81.
- Bech, N., Beltran, S., Boissier, J., Allienne, J. F., Resseguier, J. and Novoa, C. 2012. Bird mortality related to collisions with ski – lift cables : do we estimate just the tip of the iceberg ? – *Animal Biodiversity and Conservation* 35: 95–98.
- Bechard, M. J. and Mcgrady, M. J. 2002. Status and conservation of Golden Eagles. – *Journal of Raptor Research* 36: 2.
- Bohrer, G., Brandes, D., Mandel, J. T., Bildstein, K. L., Miller, T. A., Lanzone, M., Katzner, T., Maisonneuve, C. and Tremblay, J. A. 2012. Estimating updraft velocity components over large spatial scales: Contrasting migration strategies of golden eagles and turkey vultures. – *Ecology Letters* 15: 96–103.
- Braham, M., Miller, T., Duerr, A. E., Lanzone, M., Fesnock, A., LaPre, L., Driscoll, D. and Katzner, T. 2015. Home in the heat: dramatic seasonal variation in home range of desert golden eagles informs management for renewable energy development. – *Biological Conservation* 186: 225–232.
- Buskirk, S. W. and Millspaugh, J. J. 2006. Metrics for studies of resource selection. – *Journal of Wildlife Management* 70: 358–366.
- Carrete, M., Sánchez-zapata, J. A., Benítez, J. R., Lobón, M. and Donázar, J. A. 2009. Large scale risk-assessment of wind-farms on population viability of a globally endangered long-lived raptor. – *Biological Conservation* 142: 2954–2961.
- Cervantes, F., Murgatroyd, M., Allan, D. G., Farwig, N., Kemp, R., Krüger, S., Maude, G., Mendelsohn, J., Rösner, S., Schabo, D. G., Tate, G., Wolter, K. and Amar, A. 2023. A utilization distribution for the global population of Cape Vultures (*Gyps coprotheres*) to guide wind energy development. – *Ecological Applications* 1–19.
- Dale, M. R. T. and Fortin, M.-J. 2002. Spatial autocorrelation and statistical tests in ecology. – *Écoscience* 9: 162–167.
- D'Amico, M., Martins, R. C., Álvarez-Martínez, J. M., Porto, M., Barrientos, R. and Moreira, F. 2019. Bird collisions with power lines: prioritizing species and areas by estimating potential population-level impacts. – *Diversity and Distributions* 25: 975–982.
- Delgado-González, A., Cortés-Avizanda, A., Serrano, D., Arrondo, E., Duriez, O., Margalida, A., Carrete, M., Oliva-Vidal, P., Sourp, E., Morales-Reyes, Z., García-Barón, I., De La Riva, M., Sánchez-Zapata, J. A. and Donázar, J. A. 2022. Apex scavengers from different European populations converge at threatened savannah landscapes. – *Sci Rep* 12: 2500.
- Drewitt, A. L. and Langston, R. H. W. 2006. Assessing the impacts of wind farms on birds. – *Ibis* 148: 29–42.
- Duchesne, T., Fortin, D. and Rivest, L. P. 2015. Equivalence between step selection functions and biased correlated random walks for statistical inference on animal movement. – *PLoS ONE* 10: 1–12.
- Fasce, P., Fasce, L., Villers, A., Bergese, F. and Bretagnolle, V. 2011. Long-term breeding demography and density dependence in an increasing population of Golden Eagles *Aquila chrysaetos*. – *Ibis* 153: 581–591.
- Fielding, A. H., Whitfield, D. P. and Mcleod, D. R. A. 2006. Spatial association as an indicator of the potential for future interactions between wind energy developments and golden eagles *Aquila chrysaetos* in Scotland. – *Biological Conservation* 131: 359–369.
- Fluhr, J., Benhamou, S., Peyrusque, D. and Duriez, O. 2021. Space use and time budget in two populations of griffon vultures in contrasting landscapes. – *Journal of Raptor Research* <<https://doi.org/10.3356/JRR-20-14>>.
- Fortin, D., Beyer, H. L., Boyce, M. S., Smith, D. W., Duchesne, T. and Mao, J. S. 2005. Wolves influence elk movements: Behavior shapes a trophic cascade in Yellowstone National Park. – *Ecology* 86: 1320–1330.
- Frankish, C. K., Manica, A., Clay, T. A., Wood, A. G. and Phillips, R. A. 2022. Ontogeny of movement patterns and habitat selection in juvenile albatrosses. – *Oikos* 1–12.
- Garshelis, D. 2000. Delusions in habitat evaluation: measuring use, selection and preference. – In: Boitani, L. and Fuller, T. K. (eds), *Research Techniques in Animal Ecology: Controversies and Consequences*. Columbia University Press, pp. 111–153.
- Garvin, J. C., Jennelle, C. S., Drake, D. and Grodsky, S. M. 2011. Response of raptors to a windfarm. – *Journal of Applied Ecology* 48: 199–209.
- Guil, F., Fernández-Olalla, M., Moreno-Opo, R., Mosqueda, I., Gómez, M. E., Aranda, A., Arredondo, Á., Guzmán, J., Oria, J., González, L. M. and Margalida, A. 2011. Minimising mortality in endangered raptors due to power lines: The importance of spatial aggregation to optimize the application of mitigation measures. – *PLoS ONE* 6: e28212.
- Guisan, A. and Thuiller, W. 2005. Predicting species distribution: Offering more than simple habitat models. – *Ecology Letters* 8: 993–1009.
- Hanssen, F., May, R. and Nygård, T. 2020. High-resolution modeling of uplift landscapes can inform micro-siting of wind turbines for soaring raptors. – *Environmental Management* <<https://doi.org/10.1007/s00267-020-01318-0>>.
- Harel, R., Horvitz, N. and Nathan, R. 2016a. Adult vultures outperform juveniles in challenging thermal soaring conditions. – *Scientific Reports* 6: 1–8.

- Harel, R., Duriez, O., Spiegel, O., Fluhr, J., Horvitz, N., Getz, W. M., Bouten, W., Sarrazin, F., Hatzofe, O. and Nathan, R. 2016b. Decision-making by a soaring bird: Time, energy and risk considerations at different spatio-temporal scales. – *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* <<https://doi.org/10.1098/rstb.2015.0397>>.
- Hemery, A. 2024. Risk4DRaptors : Prédire les risques de collision des grands oiseaux avec les infrastructures aériennes. – PSL Université Paris - EPHE.
- Hipkiss, T., Moss, E. and Hörnfeldt, B. 2014. Variation in quality of Golden Eagle territories and a management strategy for wind farm projects in northern Sweden. – *Bird Study* 61: 444–446.
- Hirzel, A. H., Le Lay, G., Helfer, V., Randin, C. and Guisan, A. 2006. Evaluating the ability of habitat suitability models to predict species presences. – *Ecological Modelling* 199: 142–152.
- Hunt, W. G., Wiens, J. D., Law, P. R., Fuller, M. R., Hunt, T. L., Driscoll, D. E. and Jackman, R. E. 2017. Quantifying the demographic cost of human-related mortality to a raptor population. – *PLoS ONE* 12: 1–22.
- Itty, C. and Duriez, O. 2018. Le suivi par GPS, une méthode efficace pour évaluer l'impact des parcs éoliens sur des espèces à fort enjeux de conservation : l'exemple de l'aigle royal (*Aquila chrysaetos*) dans le sud du massif central. (LPO, Ed.). – *Séminaire Eolien et Biodiversité. Ligue pour la Protection des oiseaux*. : 42–48.
- Katzner, T. E., Nelson, D. M., Braham, M. A., Doyle, J. M., Fernandez, N. B., Duerr, A. E., Bloom, P. H., Fitzpatrick, M. C., Miller, T. A., Culver, R. C. E., Braswell, L. and DeWoody, J. A. 2017. Golden Eagle fatalities and the continental-scale consequences of local wind-energy generation. – *Conservation Biology* 31: 406–415.
- Krausman, P. R. and Cain, J. W. 2022. *Wildlife management and conservation: contemporary principles and practices*. – Johns Hopkins University Press.
- Loss, S. R. 2016. Avian interactions with energy infrastructure in the context of other anthropogenic threats. – *The Condor* 118: 424–432.
- Lovette, I. J. and Fitzpatrick, J. W. Eds. 2016. *Handbook of bird biology - The Cornell Lab of Ornithology*. – Wiley.
- Manly, B. F., McDonald, L., Thomas, D. L., McDonald, T. L. and Erickson, W. P. 2002. *Resource selection by animals: statistical design and analysis for field studies*. – Springer.
- Marques, A. T., Santos, C. D., Hanssen, F., Muñoz, A. R., Onrubia, A., Wikelski, M., Moreira, F., Palmeirim, J. M. and Silva, J. P. 2020. Wind turbines cause functional habitat loss for migratory soaring birds. – *Journal of Animal Ecology* 89: 93–103.
- Martens, B. 2021. Thermal flyng - for paraglider and hang glider pilots. – *Flying Pages Europe*.
- Masden, E. A. and Cook, A. S. C. P. 2016. Avian collision risk models for wind energy impact assessments. – *Environmental Impact Assessment Review* 56: 43–49.
- Miller, T. A., Brooks, R. P., Lanzone, M., Brandes, D., Cooper, J., O'Malley, K., Maisonneuve, C., Tremblay, J., Duerr, A. and Katzner, T. 2014. Assessing risk to birds from industrial wind energy development via paired resource selection models. – *Conservation Biology* 28: 745–755.
- Mojica, E. K., Dwyer, J. F., Harness, R. E., Williams, G. E. and Woodbridge, B. 2018. Review and synthesis of research investigating golden eagle electrocutions. – *Journal of Wildlife Management* 82: 495–506.
- Morrison, M. L., Marcot, B. G. and Mannan, R. W. 2006. *Wildlife-habitat relationships: concepts and applications*. – Island Press.
- Murgatroyd, M., Bouten, W. and Amar, A. 2021. A predictive model for improving placement of wind turbines to minimise collision risk potential for a large soaring raptor. – *Journal of Applied Ecology* 58: 857–868.
- Pennycuik, C. B. T.-T. E. S. 2008. *Modelling the flying bird*. (Elsevier, Ed.). – Academic Press.
- Péron, G., Fleming, C. H., Duriez, O., Fluhr, J., Itty, C., Lambertucci, S., Safi, K., Shepard, E. L. C. and Calabrese, J. M. 2017. The energy landscape predicts flight height and wind turbine collision hazard in three species of large soaring raptor. – *Journal of Applied Ecology* 54: 1895–1906.
- Reid, T., Krüger, S., Whitfield, D. P. and Amar, A. 2015. Using spatial analyses of bearded vulture movements in southern Africa to inform wind turbine placement. – *Journal of Applied Ecology* 52: 881–892.
- Ruau, G., Lumineau, S. and De Margerie, E. 2020. The development of flight behaviours in birds. – *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* <<https://doi.org/10.1098/rspb.2020.0668>>.
- Sæther, B.-E. and Bakke, O. 2000. Avian life history variation and contribution of demographic traits to the population growth rate. – *Ecology* 81: 642–653.
- Sæther, B., Grøtan, V., Engen, S., Coulson, T., Grant, P. R., Visser, M. E., Brommer, J. E., Grant, B. R., Gustafsson, L., Hatchwell, B. J., Jerstad, K. and Karell, P. 2016. Demographic routes to variability and regulation in bird populations. – *Nature Communications* 7: 1–8.
- Santos, C. D., Hanssen, F., Muñoz, A. R., Onrubia, A., Wikelski, M., May, R. and Silva, J. P. 2017. Match between soaring modes of black kites and the fine-scale distribution of updrafts. – *Scientific Reports* 7: 1–10.
- Sarasola, J. H., Galmes, M. A. and Watts, B. D. 2020. Electrocution on power lines is an important threat for the endangered Chaco Eagle (*Buteogallus coronatus*) in Argentina. – *Journal of Raptor Research* 54: 166–171.
- Shepard, E. L. C., Ross, A. N. and Portugal, S. J. 2016. Moving in a moving medium: New perspectives on flight. – *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* <<https://doi.org/10.1098/rstb.2015.0382>>.
- Singh, N. J., Moss, E., Hipkiss, T., Ecke, F., Dettki, H., Sandström, P., Bloom, P., Kidd, J., Thomas, S. and Hörnfeldt, B. 2016. Habitat selection by adult golden eagles *Aquila chrysaetos* during the breeding season and implications for wind farm establishment. – *Bird Study* 63: 233–240.
- Sparr, R., Liechti, O. and Bruderer, B. 2000. Forecasting flight altitudes and soaring performance of migrating raptors by the altitudinal profile of atmospheric conditions. – *Technical Soaring XXIV*: 49–55.
- Tack, J. D., Noon, B. R., Bowen, Z. H., Strybos, L. and Fedy, B. C. 2017. No substitute for survival: Perturbation analyses using a Golden Eagle population model reveal limits to managing for take. – *Journal of Raptor Research* 51: 258–272.

- Thaxter, C. B., Buchanan, G. M., Carr, J., Butchart, S. H. M., Newbold, T., Green, R. E., Tobias, J. A., Foden, W. B., O'Brien, S. and Pearce-Higgins, J. W. 2017. Bird and bat species' global vulnerability to collision mortality at wind farms revealed through a trait-based assessment. – *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 284: 1–10.
- Thurfjell, H., Ciuti, S. and Boyce, M. S. 2014. Applications of step-selection functions in ecology and conservation. – *Movement Ecology* 2: 1–12.
- Tikkanen, H., Rytönen, S., Karlin, O. P., Ollila, T., Pakanen, V. M., Tuohimaa, H. and Orell, M. 2018. Modelling golden eagle habitat selection and flight activity in their home ranges for safer wind farm planning. – *Environmental Impact Assessment Review* 71: 120–131.
- Tintó, A., Real, J. and Mañosa, S. 2010. Predicting and correcting electrocution of birds in Mediterranean areas. – *Journal of Wildlife Management* 74: 1852–1862.
- Watson, R. T., Kolar, P. S., Ferrer, M., Nygård, T., Johnston, N., Hunt, W. G., Smit-Robinson, H. A., Farmer, C. J., Huso, M. and Katzner, T. E. 2018. Raptor interactions with wind energy: case studies from around the world. – *Journal of Raptor Research* 52: 1–18.

INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES

TABLEAUX

Tableau 1 : Partenaires du projet	10
---	----

FIGURES

Figure 1 : Exemples de cartes de courants ascendants thermiques (à gauche) et de courants orographiques ascendants (au centre) et descendants (à droite) susceptibles d'être utilisés par un aigle royal. L'échelle de couleur représente le pourcentage de temps (exprimé en fréquence de 0 à 1) où les courants sont suffisamment puissants pour être utilisés par un aigle royal.	12
Figure 2 : Schéma récapitulatif des étapes préliminaires de la démarche Risk4DRaptors, quant à la possibilité d'utiliser ou non les données de suivis télémétriques de jeunes accipitridés pendant leur phase d'apprentissages avec leurs parents.	14
Figure 3 : Schéma de décomposition d'un trajet en 3D (en bleu). A gauche : distinction entre angle horizontal et angle vertical. A droite : hauteur de vol et longueur de pas, calculées en 3D.	14
Figure 4 : (A) Carte de prédiction à l'échelle nationale, générée pour des hauteurs de vol inférieures ou égales à 250 m du sol sur l'aire de répartition française de l'aigle royal. (B) Zoom sur une petite zone exemple. (C) Même petite zone, mais avec le gradient de couleur recalculé sur l'emprise de cette zone pour mieux visualiser le risque relatif et accentuer le contraste entre les zones à faible risque et les zones à fort risque de collision pour les aigles royaux avec des infrastructures aériennes de 250 m de hauteur.	15
Figure 5 : (A) Carte de prédiction générée pour des hauteurs de vol inférieures ou égales à 250 m du sol sur un secteur du Sud de la France où sont implantées plusieurs éoliennes (n=243, points blancs) et où deux aigles royaux suivis par télémétrie sont morts à la suite d'une collision avec une éolienne ces dernières années. Le gradient de couleur a été ajusté à l'étendue de cette zone, permettant de mieux visualiser les contrastes entre zones à faible risque et zones à risque élevé. (B) Histogramme des valeurs du risque relatif pour tous les pixels de la carte (A). 70 % des pixels de la zone sont à gauche de la ligne noire en pointillés. (C) Histogramme des valeurs de risque relatif extraites pour les positions de toutes les éoliennes présentes sur la carte (A), avec la même échelle en abscisses que (B). La ligne noire en pointillés est la même qu'en (B), matérialisant le seuil au-delà duquel on trouve 65 % des éoliennes. La ligne rouge en pointillés matérialise le seuil au-delà duquel on trouve 7 % d'éoliennes présentant le risque le plus élevé.	16
Figure 6 : (A) Carte de prédiction à l'échelle nationale, générée pour des hauteurs de vol inférieures ou égales à 250 m du sol sur l'aire de répartition française du vautour fauve. (B) Zoom sur une petite zone exemple. (C) Même petite zone, mais avec le gradient de couleur recalculé sur l'emprise de cette zone pour mieux visualiser le risque relatif et accentuer le contraste entre les zones à faible risque et les zones à fort risque de collision pour les vautours fauves avec des infrastructures aériennes de 250 m de hauteur.	18
Figure 7 : Capture d'écran de l'outil d'affichage du risque relatif à l'échelle nationale.	19
Figure 8 : Capture d'écran de l'outil de recalcul du gradient de couleurs du risque relatif à l'échelle locale.	19
Figure 9 : Schéma récapitulatif de la démarche Risk4DRaptors.	20

SIGLES ET ACRONYMES

ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
BECOT	Baguages et Etudes pour la Conservation des Oiseaux et de leurs Territoires
CEFE	Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive
CRBPO	Centre de Recherches sur la Biologie des Populations d'Oiseaux
ERC	Eviter - Réduire - Compenser
MAPE	Mortalité Aviaire dans les Parcs Eoliens
SIG	Système d'Information Géographique

L'ADEME EN BREF

À l'ADEME - l'Agence de la transition écologique -, nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources.

Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse.

Dans tous les domaines - énergie, économie circulaire, alimentation, mobilité, qualité de l'air, adaptation au changement climatique, sols... - nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions.

À tous les niveaux, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.



RISK4DRAPTORS : PREDIRE LES RISQUES DE COLLISION DES GRANDS OISEAUX AVEC LES INFRASTRUCTURES AERIENNES

Pour faire face au changement climatique, une des stratégies adoptées est de décarboner la production d'énergie en optant pour une électrification issue des énergies renouvelables, comme les éoliennes, mais dont le développement n'est pas sans conséquence pour la biodiversité. Les grands oiseaux planeurs tels que les accipitridés sont des espèces très sensibles au développement d'infrastructures aériennes.

Le présent projet a pour objectif de développer un cadre méthodologique afin de prédire les zones à risque de collision pour ces espèces avec les infrastructures aériennes, en fonction des habitats naturels et des hauteurs de vol. Cette démarche a été développée sur une espèce, l'aigle royal, mais réfléchi pour être transférable à d'autres espèces.

Les données télémétriques obtenues en équipant des jeunes aigles au nid ont d'abord été étudiées pour vérifier dans quelles conditions elles pouvaient être utilisées pour augmenter le nombre d'individus mais également l'étendue géographique (et les habitats naturels associés) dans les modèles statistiques.

Le risque qu'un aigle royal utilise un secteur pour ses déplacements a ensuite été modélisé, en fonction des habitats naturels qui composent ce secteur et en tenant compte de la hauteur à laquelle l'aigle vole, en étendant la méthode des « *step-selection functions* » à une sélection d'habitats en 3D.

La reproductibilité de la méthode a été démontrée grâce aux données de suivis télémétriques d'une autre espèce de grand rapace : le vautour fauve. Les résultats obtenus sont disponibles sous format cartographique et ont été pensés comme un outil d'aide à l'évitement à destination des aménageurs et des décideurs.

<https://risk4draptors.cefe.cnrs.fr>

