

Les déplacements des espèces volantes : vers la mise en œuvre d'une « Trame aérienne » dans le cadre de la politique Trame verte et bleue ?

Romain SORDELLO, Yorick REYJOL, Jennifer AMSALLEM, Yves BAS,
Lucille BILLON, Leyli BORNER, Jacques COMOLET-TIRMAN, Aurélien DALOZ,
Anne-Laure DUGUÉ, Éric GUINARD, Jean-François JULIEN, Aurélie LACOEUILHE,
Antoine LOMBARD, Julie MARMET, Benoît MARS, Geoffroy MARX,
Catherine MÉNARD, Fabien PAQUIER, Nathalie SCHWEIGERT, Chloé THIERRY,
Sylvie VANPEENE, Vincent VIGNON & Jean-Philippe SIBLET

DIRECTEUR DE LA PUBLICATION / *PUBLICATION DIRECTOR*: Bruno David,
Président du Muséum national d'Histoire naturelle

RÉDACTEUR EN CHEF / *EDITOR-IN-CHIEF*: Jean-Philippe Siblet

ASSISTANTE DE RÉDACTION / *ASSISTANT EDITOR*: Sarah Figuet (naturae@mnhn.fr)

MISE EN PAGE / *PAGE LAYOUT*: Sarah Figuet

COMITÉ SCIENTIFIQUE / *SCIENTIFIC BOARD*:

Luc Abbadie (UPMC, Paris)
Luc Barbier (Parc naturel régional des caps et marais d'Opale, Colembert)
Aurélien Besnard (CEFE, Montpellier)
Vincent Boulet (Expert indépendant flore/végétation, Frugières-le-Pin)
Hervé Brustel (École d'ingénieurs de Purpan, Toulouse)
Patrick De Wever (MNHN, Paris)
Thierry Dutoit (UMR CNRS IMBE, Avignon)
Éric Feunteun (MNHN, Dinard)
Romain Garrouste (MNHN, Paris)
Grégoire Gautier (DRAAF Occitanie, Toulouse)
Olivier Gilg (Réserves naturelles de France, Dijon)
Frédéric Gosselin (Irstea, Nogent-sur-Vernisson)
Patrick Haffner (PatriNat, Paris)
Frédéric Hendoux (MNHN, Paris)
Xavier Houard (OPIE, Guyancourt)
Isabelle Le Viol (MNHN, Concarneau)
Francis Meunier (Conservatoire d'espaces naturels – Hauts-de-France, Amiens)
Serge Muller (MNHN, Paris)
Francis Oliveau (DREAL Centre, Orléans)
Laurent Poncet (PatriNat, Paris)
Nicolas Poulet (OFB, Vincennes)
Jean-Philippe Siblet (PatriNat, Paris)
Laurent Tillon (ONF, Paris)
Julien Touroult (PatriNat, Paris)

COUVERTURE / *COVER*:

Vol de Grues cendrées *Grus grus* (Linnaeus, 1758). Crédit photo: Romain Sordello.

Naturae est une revue en flux continu publiée par les Publications scientifiques du Muséum, Paris
Naturae is a fast track journal published by the Museum Science Press, Paris

Les Publications scientifiques du Muséum publient aussi / *The Museum Science Press also publish*:

Adansonia, Zoosystema, Anthropozoologica, European Journal of Taxonomy, Geodiversitas, Cryptogamie sous-sections **Algologie, Bryologie, Mycologie, Comptes Rendus Palevol**.

Diffusion – Publications scientifiques Muséum national d'Histoire naturelle
CP 41 – 57 rue Cuvier F-75231 Paris cedex 05 (France)
Tél.: 33 (0)1 40 79 48 05 / Fax: 33 (0)1 40 79 38 40
diff.pub@mnhn.fr / <https://sciencepress.mnhn.fr>

© Publications scientifiques du Muséum national d'Histoire naturelle, Paris, 2022
ISSN (électronique / *electronic*): 1638-9387

Les déplacements des espèces volantes : vers la mise en œuvre d'une « Trame aérienne » dans le cadre de la politique Trame verte et bleue ?

Romain SORDELLO

Yorick REYJOL

PatriNat, OFB, CNRS, MNHN,
57 rue Cuvier, boîte postale 41, F-75231 Paris cedex 05 (France)

romain.sordello@mnhn.fr

yorick.reyjol@mnhn.fr

Jennifer AMSALLEM

TETIS (AgroParisTech, CIRAD, INRAE, CNRS), Maison de la Télédétection,
500 rue Jean-François Breton, F-34093 Montpellier (France)

jennifer.amsallem@inrae.fr

Yves BAS

Centre d'Écologie et des Sciences de la Conservation, Muséum national d'Histoire naturelle,
boîte postale 135, 43 rue Buffon, F-75231 Paris cedex 05 (France)
et Centre d'Écologie fonctionnelle et évolutive (CNRS, EPHE, IRD),
Université de Montpellier, 1919 route de Mende, F-34090 Montpellier (France)

yves.bas@mnhn.fr

Lucille BILLON

PatriNat, OFB, CNRS, MNHN,
57 rue Cuvier, boîte postale 41, F-75231 Paris cedex 05 (France)

lucille.billon@mnhn.fr

Leyli BORNER

Centre d'Écologie et des Sciences de la Conservation, Muséum national d'Histoire naturelle,
boîte postale 135, 43 rue Buffon, F-75231 Paris cedex 05 (France)
et Centre d'Écologie fonctionnelle et évolutive (CNRS, EPHE, IRD),
Université de Montpellier, 1919 route de Mende, F-34090 Montpellier (France)

leyli.borner@gmail.com

Jacques COMOLET-TIRMAN

PatriNat, OFB, CNRS, MNHN,
57 rue Cuvier, boîte postale 41, F-75231 Paris cedex 05 (France)

jacques.comolet-tirman@ofb.gouv.fr

Aurélien DALOZ

Office français de la Biodiversité, Direction Acteurs et Citoyens,
Site de Montpellier, Immeuble Le Tabella – 125 impasse Adam Smith, F-34470 Pérols (France)

aurelien.daloz@ofb.gouv.fr

Anne-Laure DUGUÉ

Ligue pour la Protection des Oiseaux,
Fonderies Royales, CS 90263, F-17305 Rochefort cedex (France)

anne-laure.dugue@lpo.fr

Éric GUINARD

Cerema, Direction territoriale Sud-Ouest
Rue Pierre Ramond, CS 60013, F-33166 Saint-Médard-en-Jalles cedex (France)
eric.guinard@cerema.fr

Jean-François JULIEN

Centre d'Écologie et des Sciences de la Conservation, Muséum national d'Histoire naturelle,
boîte postale 135, 43 rue Buffon, F-75231 Paris cedex 05 (France)
jean-francois.julien@mnhn.fr

Aurélié LACOEUILHE

PatriNat, OFB, CNRS, MNHN,
57 rue Cuvier, boîte postale 41, F-75231 Paris cedex 05 (France)
aurelie.lacoeuilhe@mnhn.fr

Antoine LOMBARD

DRIEE, Service nature, paysage et ressources,
12 cours Louis Lumière, CS 70027, F-94307 Vincennes cedex (France)
antoine.lombard@developpement-durable.gouv.fr

Julie MARMET

PatriNat, OFB, CNRS, MNHN,
57 rue Cuvier, boîte postale 41, F-75231 Paris cedex 05 (France)
et Centre d'Écologie et des Sciences de la Conservation, Muséum national d'Histoire naturelle,
boîte postale 135, 43 rue Buffon, F-75231 Paris cedex 05 (France)
julie.marmet@mnhn.fr

Benoît MARS

Direction générale de l'Aviation civile (DGAC), subdivision « Prévention du risque animalier »,
50 rue Henry Farman, F-75720 Paris cedex 1 (France).
benoit.mars@developpement-durable.gouv.fr

Geoffroy MARX

Ligue pour la Protection des Oiseaux,
8 rue du Docteur Pujos, CS 90263, F-17305 Rochefort cedex (France)
geoffroy.marx@lpo.fr

Catherine MÉNARD

DREAL Nouvelle-Aquitaine,
15 rue Arthur Ranc, CS 60539, F-86020 Poitiers cedex (France)
catherine.menard@developpement-durable.gouv.fr

Fabien PAQUIER

Office français de la Biodiversité, Service Territoires et Entreprises,
Le Tabella, 125 rue Adam Smith, F-34470 Pérols (France)
fabien.paquier@ofb.gouv.fr

Nathalie SCHWEIGERT

Service technique de l'Aviation civile (STAC),
9 avenue du Docteur Maurice Grynfolgel, F-31037 Toulouse (France)
nathalie.schweigert@developpement-durable.gouv.fr

Chloé THIERRY

PatriNat, OFB, CNRS, MNHN,
4 avenue du Petit Château, F-91800 Brunoy (France)
chloe.thierry@mnhn.fr

Sylvie VANPEENE

UMR Risques, ECOSystèmes, Vulnérabilité, Environnement, Résilience (RECOVER),
INRAE, Centre PACA, 3275 route Cézanne, CS 40061, F-13182 Aix-en-Provence cedex 5 (France)
sylvie.vanpeene@inrae.fr

Vincent VIGNON

Office de Génie écologique

5 boulevard de Créteil, F-94100 Saint-Maur-des-Fossés (France)

v.vignon@oge.fr

Jean-Philippe SIBLET

1 bis, rue des sablonnières, 77670 Saint-Mammès (France)

jean-philippe.siblet@mnhn.fr

Soumis le 30 juin 2020 | Accepté le 22 juin 2021 | Publié le 8 juin 2022

Sordello R., Reyjol Y., Amsellem J., Bas Y., Billon L., Borner L., Comolet-Tirman J., Daloz A., Dugué A.-L., Guinard É., Julien J.-F., Lacoëuilhe A., Lombard A., Marmet J., Mars B., Marx G., Ménard C., Paquier F., Schweigert N., Thierry C., Vanpeene S., Vignon V. & Sibley J.-P. 2022. — Les déplacements des espèces volantes : vers la mise en œuvre d'une « Trame aérienne » dans le cadre de la politique Trame verte et bleue? *Naturae* 2022 (9): 169-192. <https://doi.org/10.5852/naturae2022a9>

RÉSUMÉ

Alors que de nombreux animaux fréquentent l'espace aérien, les activités humaines occupent également sensiblement cette strate. Dans cet article nous prenons l'exemple de quatre types d'obstacles – les aéronefs, le bâti, les éoliennes et les lignes électriques – afin d'illustrer leurs impacts sur trois groupes d'espèces volantes en particulier, les Oiseaux, les Chauves-souris et les Insectes. Nous montrons que, d'après la littérature existante, ces obstacles aériens sont clairement une source de mortalité par collision, électrocution ou barotraumatisme, en plus de générer des nuisances, une perte et une fragmentation des habitats. Cependant, la quantification de ces problèmes reste très variable en fonction des obstacles et des espèces et en France elle est globalement mal connue (à l'exception des aéronefs et, dans une moindre mesure, des éoliennes). Nous présentons ensuite différentes mesures de gestion qui sont d'ores et déjà mises en œuvre ou testées pour diminuer ces impacts. Mais il ressort aussi que leur déploiement est très variable selon les obstacles (par exemple, la gestion du risque aviaire sur les aéroports bénéficie de plusieurs décennies d'expériences alors que l'impact du bâti n'est quasiment pas pris en compte) et que la plupart du temps ces mesures sont sectorielles et plus ou moins efficaces à ce jour (certaines restant au stade de la recherche et du développement). Nous soulignons alors l'intérêt d'une démarche globale, via l'approche par trames, afin d'approfondir ces problématiques, et proposons plusieurs pistes pour mettre en œuvre cette « Trame aérienne ».

MOTS CLÉS
Réseau écologique,
mortalité,
vol actif,
Chiroptères,
avifaune.

ABSTRACT

The movement of flying species: towards the implementation of an «aerial infrastructure» in the context of the green and blue Infrastructure policies?

While many animals use the airspace, human activities also occupy this space significantly. In this article we consider four types of obstacles – aircrafts, buildings, wind turbines and power lines – to illustrate their impacts on birds, bats and insects. Literature shows that these airborne obstacles cause mortality through collisions, electrocutions and barotrauma, in addition to generating disturbance and habitat loss/fragmentation. However, the quantification of these problems remains highly variable depending on the obstacles and species, and is generally poorly known in France (except for aircraft and, to a lesser extent, wind turbines). We then present various management measures that are already being implemented or tested to reduce these impacts. However, here again, we stress that their deployment varies greatly depending on the obstacles. For example, bird hazard management at airports benefits from several decades of experience while the impact of buildings is hardly considered. Most of the time these measures are sector-based and remain more or less effective to date. We therefore underline the interest of a global approach based on green infrastructures concepts, in order to explore these issues and propose several suggestions to implement an aerial ecological network.

KEY WORDS
Ecological network,
mortality,
active flight,
chiropterans,
avifauna.

INTRODUCTION

Le dernier rapport de l'IPBES (*Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*) (2019) estime que plus d'un million d'espèces seraient menacées d'extinc-

tion. La disparition et la fragmentation des habitats naturels font partie des causes majeures de cette érosion massive de la biodiversité (Xu *et al.* 2018). L'urbanisation, certaines formes d'agriculture ou encore différentes infrastructures (transport, énergie, etc.) en particulier participent à la fragmentation des

habitats et ont pour conséquence de réduire les surfaces et de segmenter les milieux naturels en reliquats (Silva *et al.* 2010 ; Torres *et al.* 2016). Les déplacements de la faune et de la flore sont alors limités voire empêchés (Kerth & Melber 2009). Ces obstacles peuvent également entraîner une mortalité directe par collision (Matos *et al.* 2012) et générer des effets sur les dynamiques de population et à long terme sur le plan génétique (Keller *et al.* 2004). En réponse à ces phénomènes, les scientifiques préconisent de préserver et restaurer des réseaux écologiques (Pryke *et al.* 2015). Les travaux scientifiques ont en effet démontré que la connectivité paysagère – c'est-à-dire le degré de connexion entre milieux naturels dans un paysage donné – améliore sensiblement la structure et le fonctionnement de la biodiversité (Thiele *et al.* 2018 ; Serrano *et al.* 2020). Un réseau écologique est constitué d'habitats reliés par des continuités qui facilitent la libre circulation des espèces (Davies & Pullin 2006 ; Gilbert-Norton *et al.* 2010 ; Hüse *et al.* 2016).

Depuis quelques décennies, la mise en place et l'optimisation des réseaux écologiques se sont de plus en plus développées au sein des stratégies de protection de la biodiversité (Jongman *et al.* 2004 ; Bennett *et al.* 2014). À l'échelle mondiale, l'Union internationale pour la Conservation de la Nature (UICN) met en avant ces réseaux écologiques comme un outil clé pour la conservation de la nature ; ils sont développés à travers tous les continents (Bennett 2003 ; Worboys *et al.* 2010). En Europe, la Commission européenne promeut la « Green and blue infrastructure » pour favoriser la biodiversité et les services qu'elle fournit (qualité de vie, régulation des risques naturels, pollinisation, etc.) (European Commission 2012 ; 2019a). Ainsi, depuis la fin des années 1990 environ, les États membres de l'Union européenne sont nombreux à promouvoir, à leur échelle nationale, des politiques de préservation et de restauration de réseaux écologiques (Jongman 1995 ; European Commission 2019b). En France, la Trame verte et bleue (TVB) est mise en œuvre par le Ministère en charge de l'Écologie depuis le Grenelle de l'environnement (lois « Grenelle » de 2009 et 2010). Elle repose sur l'identification de continuités écologiques terrestres et aquatiques (eau douce, la partie strictement maritime n'est pas couverte) dans le but de les préserver et de les restaurer. Elle prend aussi en compte les obstacles à ces continuités pour essayer de les résorber. Reprenant les concepts de l'écologie du paysage, elle est constituée de réservoirs de biodiversité et de corridors. Ces éléments sont identifiés pour différentes sous-trames correspondant aux grands milieux naturels (boisés, ouverts, humides, cours d'eau, littoraux) et dont la superposition forme le réseau écologique (Sordello *et al.* 2017).

La politique TVB se décline à trois échelles territoriales : nationale, régionale et locale (communes et intercommunalités). Au niveau national, ce sont des « orientations nationales » qui fixent le cadre et les objectifs de la politique (MTES 2014 ; Billon *et al.* 2020). À l'échelle régionale, l'identification de la TVB se fait au travers des Schémas régionaux de cohérence écologique (SRCE), désormais inclus dans les Schémas régionaux d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires (Sraddet). Les communes et intercommunalités,

quant à elles, intègrent les continuités écologiques dans leurs schémas d'aménagement et d'urbanisme respectifs (plans locaux d'urbanisme, schéma de cohérence territoriale, chartes de parcs naturels régionaux, etc.).

Différents bilans techniques et scientifiques ont été menés sur la mise en application aux différentes échelles de cette politique publique française (Vanpeene *et al.* 2017 ; Amsallem *et al.* 2018). Il s'avère que certaines dimensions restent encore insuffisamment prises en compte, notamment la strate aérienne (Sordello 2017, 2019b). En effet, si les espèces volantes sont, elles aussi, concernées par les obstacles terrestres (elles sont par exemple victimes de collisions avec les véhicules) (Guinard *et al.* 2012 ; Fensome & Mathews 2016 ; Skórka *et al.* 2018), elles sont, en plus, exposées à des obstacles particuliers situés largement au-dessus du sol. Des études démontrent effectivement que la faune volante peut entrer en conflit avec les bâtiments, les avions, les câbles (lignes électriques ou de transport par câble aérien) ou encore les pales des éoliennes (Blackwell & Wright 2006 ; Shobrak 2012 ; Hayes 2013). Des problématiques spécifiques, pas ou peu prises en compte dans le dispositif actuel de la Trame verte et bleue, sont donc à analyser de manière approfondie pour ces espèces.

Cet article revient tout d'abord sur l'utilisation de la strate aérienne par la faune en prenant le cas des Oiseaux, des Chauves-souris et des Insectes afin d'illustrer la diversité des espèces au vol actif. Bien que la connaissance disponible sur les Insectes soit apparue très lacunaire voire inexistante, nous avons malgré tout souhaité les conserver dans notre étude au regard de leur rôle majeur dans les écosystèmes. Dans un second temps, un bilan synthétique des principaux risques de conflits aériens pour ces organismes est dressé, dans la limite des connaissances disponibles. Pour cela, nous avons considéré quatre obstacles principaux : les aéronefs, le bâti, les éoliennes et les lignes électriques. Enfin, cet article présente les solutions mises en œuvre pour réduire les impacts de ces obstacles en France dans l'état actuel des dispositifs. En conclusion, nous formulons des recommandations pour une meilleure prise en compte de ces enjeux, notamment via l'acquisition de connaissances, le traitement des données disponibles et plus largement la mise en place d'une trame dite « aérienne » en France. Afin de rester dans la démarche initiale de la TVB qui ne s'applique pas en mer, nous nous sommes concentrés sur des obstacles aériens terrestres et n'avons pas approfondi le volet marin (éolien en mer par exemple) ; on peut cependant faire l'hypothèse que ce qui est développé dans cet article pour les écosystèmes terrestres s'applique dans la majorité des cas aux écosystèmes marins, au bémol près que ce ne sont pas les mêmes espèces qui sont concernées. Par ailleurs, nous savons que la lumière artificielle peut occasionner d'importants conflits aériens (Van Doren *et al.* 2017). Néanmoins, afin de se concentrer sur la notion de trame aérienne et non sur la trame noire, cet aspect « lumière artificielle » n'a pas été considéré dans cet article comme un obstacle indépendant mais comme un facteur amplificateur des obstacles listés précédemment (ex. : présence de dispositifs lumineux sur du bâti ou sur les éoliennes). Cet effet additionnel sera donc évoqué tout au long de l'article dans le cas des obstacles concernés.

L'OCCUPATION DE LA STRATE AÉRIENNE : ILLUSTRATION AVEC TROIS GROUPES BIOLOGIQUES

QU'APPELLE-T-ON UNE ESPÈCE « VOLANTE » ?

Ici, nous considérerons comme espèce volante toute espèce capable de vol actif, c'est-à-dire provoqué par un battement d'ailes. En effet, de nombreux animaux effectuent des déplacements aériens « passifs », en se laissant porter par le vent, et ils ne peuvent donc pas diriger intentionnellement leur mouvement. C'est le cas par exemple, des Arachnides et de nombreux autres Arthropodes, de certains Mammifères comme les « écureuils volants » ou encore de certaines espèces végétales qui présentent des adaptations morphologiques au niveau des graines ou des fruits permettant une dispersion aérienne (anémochorie). C'est parmi les Insectes que sont apparus les premiers organismes capables de vol actif, ce qui a constitué une innovation majeure au cours de l'évolution (comportement anti-prédateur, conquête de nouveaux territoires, etc.). Parmi les Mammifères, seules les Chauves-souris ont cette capacité. Chez les Oiseaux, le vol actif est une caractéristique de toutes les espèces, à l'exception de quelques-unes qui ont perdu cette faculté au cours du temps (ex. : Casoars, Émeus, Nandous, Kiwis, Atriches, Manchots, certaines espèces d'Anatidés).

POURQUOI SE DÉPLACER ?

Les Insectes, les Oiseaux et les Chauves-souris effectuent plusieurs types de déplacements aériens. Certains sont quotidiens et répondent à des besoins alimentaires ou de regroupements alors que d'autres sont plus ponctuels ou concentrés sur des périodes particulières de l'année (ex. : reproduction, dispersion). La dispersion, qui permet notamment la conquête de nouveaux territoires, joue un rôle majeur dans la dynamique des populations et l'évolution des aires de répartition, d'autant plus dans le contexte actuel du changement climatique.

Par ailleurs, ces trois groupes biologiques comprennent des espèces migratrices. Cela signifie que tout ou partie de leurs populations effectuent un déplacement au printemps et à l'automne et ne fréquentent donc pas le même territoire toute l'année.

La France constitue un carrefour migratoire où se croisent plusieurs voies principales traversant l'ouest du Paléarctique (il existe aussi des exceptions avec des espèces qui hivernent en Inde ou dans le Sud-Est asiatique). Les axes migratoires sont donc le plus souvent orientés selon un axe nord-sud. On distingue notamment une voie atlantique, longeant les côtes et traversant le pays en diagonale depuis le nord jusqu'en Vendée par la Champagne et la Sologne, et une voie de la vallée du Rhin à la Camargue en passant par la Dombes et le Sillon Rhodanien. La plupart des espèces migrent sur un large front ; toutefois certaines configurations paysagères concentrent les individus, en particulier les côtes, les grandes vallées et les détroits pour les Oiseaux terrestres (alors qu'en mer ce sont surtout les patrons dominants de vents qui structurent les axes de migration) (Zucca 2015).

En France, la majorité des espèces d'Oiseaux sont des migrants, stricts ou partiels, et selon les espèces, le pays peut représenter un lieu d'hivernage, de halte migratoire ou de reproduction, parfois les trois à la fois. Chez certaines espèces, les individus peuvent migrer de manière groupée, ce qui se traduit par de très nombreux effectifs empruntant une même route, souvent identique d'une année à l'autre. Ces migrations peuvent représenter des distances annuelles de quelques centaines de kilomètres à plus de 80 000 kilomètres. Certaines espèces effectuent leur migration d'une seule traite, mais la plupart effectuent des haltes migratoires les exposant aux obstacles aériens même lorsque leur hauteur de vol est globalement élevée. Les migrations peuvent être diurnes ou nocturnes.

Concernant les Chauves-souris, aucune espèce européenne n'est strictement sédentaire (Arthur & Lemaire 2015). Des déplacements saisonniers de quelques dizaines de kilomètres entre le gîte hivernal et le gîte estival sont connus chez la plupart des espèces. Certaines effectuent des migrations bien plus longues, entre 1000 et 2000 km, comme la Noctule commune (*Nyctalus noctula* (Schreber, 1774)), la Noctule de Leisler (*Nyctalus leisleri* (Kuhl, 1817)) et la Pipistrelle de Nathusius (*Pipistrellus nathusii* (Keyserling & Blasius, 1839)) (Fig. 1). La Sérotine bibolore (*Vespertilio murinus* Linnaeus, 1758) est également connue pour effectuer des migrations longues, jusqu'à 1400 voire 1800 km, tout comme, dans une moindre mesure, le Murin des marais (*Myotis dasycneme* (Boie, 1825)) qui parcourt jusqu'à 300 km (Hutterer *et al.* 2005 ; Kawai *et al.* 2015).

Chez certaines espèces d'Insectes, des générations printanières et estivales sont aussi observées en France et des générations hivernales en Afrique, ce qui révèle un comportement migratoire (Sordello *et al.* 2011). C'est le cas par exemple de la Vanesse des chardons, aussi appelée Belle Dame, *Vanessa cardui* (Linnaeus, 1758), un Lépidoptère observé en hiver jusque dans le nord du Bénin. Si les voies de migration utilisées par les Insectes sont moins bien étudiées que celles fréquentées par les Oiseaux, certains grands axes et points de passage sont empruntés de manière semblable. Par exemple, pour les Papillons, on constate principalement, à partir du détroit de Gibraltar, un axe le long du littoral atlantique, un axe le long de la méditerranée et un axe le long de la vallée du Rhône. Ce n'est alors pas forcément le même individu qui effectue la migration aller et retour mais ses descendants.

La dispersion sur de longues distances peut également être apparentée à une migration (exemple des mouvements post-nuptiaux vers le nord des Rolliers d'Europe *Coracias garrulus* Linnaeus, 1758 et des Faucons crécerellettes *Falco naumanni* Fleischer, 1818). Il peut aussi s'agir d'erratisme d'individus immatures sexuellement, ce qui s'inscrit dans un comportement exploratoire. Enfin, notons que chez les Oiseaux comme chez les Insectes, certains déplacements intra-hivernaux sur longue distance sont observés et peuvent être apparentés à des migrations. Ils sont réguliers chez la plupart des espèces et répondent à une stratégie d'utilisation des ressources dans le temps et l'espace en fonction de leur accessibilité. Ils peuvent aussi être liés à des conditions climatiques particulières favorisant la colonisation de nouveaux territoires.



FIG. 1. — Pipistrelle de Nathusius (*Pipistrellus nathusii* (Keyserling & Blasius, 1839)), une espèce de Chauve-souris migratrice. Crédit photo : Laurent Arthur.

Pour les Chauves-souris, la transhumance désigne des mouvements non migratoires, entre gîtes d'hiver et d'été, de l'ordre de quelques dizaines de kilomètres, pratiqués par la plupart des espèces.

ORIENTATION ET HAUTEUR DU VOL

(À L'INTÉRIEUR DU DOMAINE VITAL ET EN MIGRATION)

Pour se repérer en vol, les Oiseaux mobilisent la vue, l'odorat et la perception du champ magnétique. Concernant la vue, plusieurs repères sont utilisés tels que la voûte céleste la nuit ou le paysage le jour (Scacco *et al.* 2019). Diverses composantes visuelles interviennent, tels la lumière polarisée, l'azimut solaire ou le centre de rotation de l'hémisphère nocturne. L'usage de repères paysagers ne concerne qu'une partie des espèces migratrices (notamment les planeurs qui recherchent les éléments du paysage susceptibles de générer des courants thermiques). En migration nocturne, les repères célestes viennent en complément du champ magnétique (Able & Able 1990). Les Oiseaux peuvent ainsi migrer par nuit couverte, donc sans voir les étoiles, en se fiant alors uniquement à leur boussole magnétique, mais ils sont par conséquent un peu moins précis. Lorsque la vision du ciel nocturne est altérée (pollution lumineuse, conditions météorologiques, etc.), les risques de collision avec des obstacles aériens sont amplifiés.

Les Oiseaux peuvent voler jusqu'à 9000-10000 m au-dessus du sol mais la hauteur de vol varie selon les espèces et les conditions extérieures (météo par exemple). Certains Oiseaux planeurs sont fortement dépendants des courants thermiques pour leur ascendance ou leurs déplacements. Les ascendances sont donc à considérer comme des ressources recherchées par

les rapaces qui apprennent à les identifier et les repérer de loin, en observant les autres rapaces et en s'aidant des repères célestes (cumulus) ou paysagers (hétérogénéité). Pour ce qui est de la migration, les altitudes de migration des Oiseaux vont aussi varier pour une même espèce en fonction des conditions météorologiques (Dokter *et al.* 2011), voire entre les migrations « aller » ou « retour ». La hauteur de migration varie aussi en fonction des stratégies migratoires et de la durée de l'étape. Généralement, les Passereaux migrateurs nocturnes migrent entre 200 m et 4000 m, avec une moyenne autour de 1500 m. Les migrateurs diurnes volent beaucoup plus bas, surtout par vent de face (Zucca 2015). Depuis longtemps les radars apportent de précieuses informations sur la hauteur des principaux flux. De nos jours, les géolocalisateurs permettent de mieux comprendre les stratégies de vol individuelles. Les connaissances sur les hauteurs de vol et de nombreux autres paramètres de la migration des Oiseaux sont ainsi sur le point d'être fortement complétées grâce à des études récentes (Liechti *et al.* 2018 ; Jiguet *et al.* 2019).

Bien qu'elles se servent aussi de la vue, de la perception du champ magnétique ou de l'odorat, les Chauves-souris utilisent principalement l'écholocation pour se repérer en vol, c'est-à-dire qu'elles analysent l'écho de leurs propres sons (émis dans des fréquences de 10 à 120 kHz) pour décrypter leur environnement. Celles qui sont connues pour traverser les mers, comme le Murin de Capaccini (*Myotis capaccinii* (Bonaparte, 1837)) par exemple, peuvent sans doute aussi se repérer via la magnitude terrestre ou les étoiles (Arthur & Lemaire 2015). Nous savons en effet que les Chauves-souris ont la faculté d'utiliser le champ magnétique (Wang *et al.* 2007 ; Holland *et al.* 2008 ;

Tian *et al.* 2019). Le développement récent des techniques de comptages et de suivis des Chiroptères a aussi permis de préciser des hauteurs de vol. Par exemple, des suivis radars ont montré que des Grandes Noctules (*Nyctalus lasiopterus* (Schreber, 1780)) chassent jusqu'à 1700 m et que les Noctules communes (*Nyctalus noctula*) migrent jusqu'à 1200 m de hauteur.

Différentes stratégies selon les espèces existent aussi chez les Chauves-souris pour les déplacements quotidiens, le rythme journalier et saisonnier et l'objectif du déplacement. En ce qui concerne la chasse par exemple, on peut distinguer de manière générale les espèces de haut vol (comme les noctules, molosses, etc.), qui chassent le plancton aérien, les espèces que l'on trouve à différentes hauteurs (pipistrelles, minioptères, etc.), les espèces glaneuses qui chassent à l'affût et vont attraper des proies posées au sol ou sur les feuillages (comme les rhinolophes) et les espèces de milieux aquatiques qui chassent au-dessus de l'eau (comme certains murins).

Chez les Insectes les observations de migrations rapportent généralement des hauteurs de vol assez proches du sol, mais les radars détectent des migrations en altitude qui sont encore assez méconnues (Zucca, comm. pers.). Certains comportements de vol et stratégies migratoires seraient relativement comparables à ceux des Oiseaux (Alerstam *et al.* 2011).

DES OBSTACLES PARTICULIERS : QUATRE GRANDS TYPES PRIS EN EXEMPLE

Une recherche bibliographique standardisée a été effectuée sur la plateforme Web of Knowledge (<http://www.webofknowledge.com>, dernière consultation le 18 juin 2021). Des équations de recherche ont été construites pour chacun des quatre types d'obstacles (aéronefs, bâti, éoliennes, lignes électriques) (voir Annexe 1). Des requêtes ont ensuite été réalisées le 18 juin 2021 sur la base de littérature Web of Science Core Collection, pour chacun des trois groupes biologiques (Chauves-souris, Insectes, Oiseaux).

Les résultats (Fig. 2) mettent en évidence une littérature déjà disponible pour les Oiseaux, qui rassemble 335 références tous obstacles confondus (soit 75 % des documents trouvés). À l'inverse, ils mettent en évidence un manque important de publications pour les Insectes et les Chauves-souris (à l'exception de l'éolien pour ces dernières). Rappelons que pour les Insectes, l'importance des collisions « terrestres » (par exemple avec les véhicules) est elle-même déjà très mal connue, d'une part, parce que très peu d'études semblent avoir été menées (notons cette étude menée par des chercheurs de l'INRA en 1990 autour de la forêt de Fontainebleau puis reproduite en 2013 [<https://www.arb-idf.fr/article/enquete-Insectes-aeriens/>, dernière consultation le 18 juin 2021]; l'étude originale de 1990 n'a pas pu être trouvée) et, d'autre part, parce que certains facteurs rendent très difficile toute quantification, notamment la visibilité et la persistance des cadavres (Skórka 2016).

Cette recherche bibliographique, préliminaire, ne vise pas l'exhaustivité et reste exploratoire, elle donne un premier aperçu de l'état des connaissances et ses résultats restent à confirmer par des investigations plus poussées (notamment

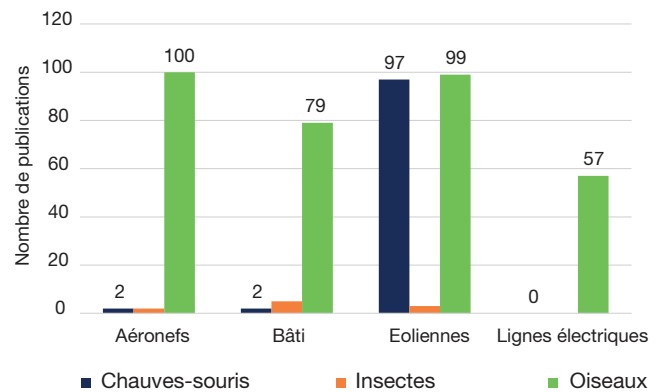


Fig. 2. — Nombre de publications pour chaque type d'obstacle et groupe biologique.

par l'ajout de mots clés et une extension de la recherche aux résumés et mots clés des publications).

AÉRONEFS

Problématique

Les aéronaves (motorisés, comme les avions et hélicoptères ou non, comme les planeurs) peuvent entrer en collision avec la faune volante, en particulier les Oiseaux. Cette probabilité de rencontre n'est pas négligeable et le secteur de l'aéronautique parle de « risque aviaire ». Ces chocs, presque toujours fatals pour les Oiseaux, peuvent également être dommageables voire destructeurs pour les aéronaves et provoquer des catastrophes aériennes. Le premier accident d'avion officiellement imputé à une collision en vol avec un Oiseau et ayant fait des victimes date de 1912 en Californie (Sodhi 2002). L'accident majeur le plus récent reste l'amerrissage d'un Airbus A320 dans l'Hudson à la suite d'une double ingestion (terme consacré) dans ses réacteurs de Bernaches du Canada (*Branta canadensis* (Linnaeus, 1758)). En France on peut mentionner la collision avec ingestion multiple d'Oiseaux (Vanneaux huppés (*Vanel-lus vanellus* (Linnaeus, 1758)) en 1995 à Paris-Le Bourget.

En ce qui concerne les Chauves-souris, une seule étude sur les collisions avec des aéronaves a été trouvée dans notre recherche. Cette étude a recensé les collisions entre avions civils et Chauves-souris en Irlande pendant dix ans (2006-2015) (Kelly *et al.* 2017). Les auteurs ont comptabilisé cinq incidents dont trois avec des Noctules de Leisler, un avec une Pipistrelle pygmée (*Pipistrellus pygmaeus* (Leach, 1825)) et un avec un Murin de Natterer (*Myotis nattereri* (Kuhl, 1817)). Compte tenu des limites que présente un tel recensement (ex. : difficulté à retrouver et identifier les cadavres), ces résultats ne reflètent vraisemblablement pas le nombre réel de collisions.

Concernant les Insectes, aucune étude n'a été trouvée sur ce sujet.

Quantification en France

Depuis 2001, le Service technique de l'Aviation civile (STAC) de la Direction générale de l'Aviation civile (DGAC) du Ministère de la Transition écologique et solidaire (MTES) publie régulièrement un rapport d'analyse du risque anima-

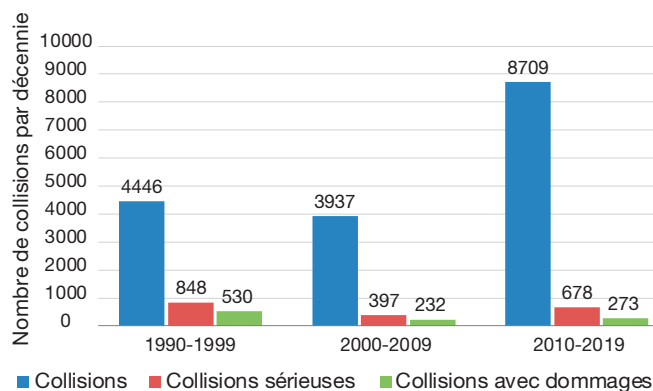


Fig. 3. — Nombre de collisions (métropole et outre-mer) sur les trente dernières années. Source : Service technique de l'Aviation civile (STAC).

lier et de nombreuses informations sont disponibles en ligne (STAC 2020 ; <https://www.stac.aviation-civile.gouv.fr/fr/securite-aerodromes/risque-animalier>, dernière consultation le 10 mai 2022). D'une manière générale, les collisions entre les Oiseaux et les aéronefs ont lieu à moins de 150 m au-dessus du sol (Dolbeer 2006) et les données 2010-2019 montrent qu'en France les accidents se concentrent même à 85 % au décollage et à l'atterrissage (90 % à l'échelle mondiale), soit à une hauteur inférieure à 15 m par rapport au sol. Les incidents les plus sérieux sont deux fois plus nombreux au décollage qu'à l'atterrissage.

En France métropolitaine et outre-mer, sur la décennie 2010-2019, 8709 collisions animalières ont été enregistrées, dont près de 7,8 % sont jugées sérieuses (dommages plus ou moins graves sur la structure ou les moteurs de l'avion, incidences sur la sécurité aérienne ou l'exploitation des compagnies aériennes telles qu'un arrêt moteur, un atterrissage de prudence, un décollage interrompu, un demi-tour, des retards, etc.) et près de 3 % ont occasionné des dommages (Fig. 3). En comparaison, ces chiffres étaient de 3937 collisions, 10 % sérieuses et 5,8 % avec dommages sur la décennie 2000-2009 et de 4446 collisions, 19 % sérieuses et 5,8 % avec dommages sur la décennie 1990-1999. Ces chiffres montrent donc, sur la dernière décennie notamment, que :

- le nombre total de collisions animalières continue d'augmenter (fortement) en France. Cette évolution constatée aussi au niveau international peut s'expliquer par l'augmentation du trafic aérien (il a augmenté en France de 2,6 % par an en moyenne sur ces trente dernières années, avant la phase de pandémie), l'optimisation des procédures de recensement des collisions ou encore certaines avancées technologiques (ex. : des moteurs de plus en plus silencieux qui retardent le temps de réaction des Oiseaux) ;

- en proportion du nombre de collisions recensées, les collisions sérieuses et avec dommages (matériels ou humains) sont, quant à elles, fortement en baisse. Ces évolutions positives sont à mettre en relation avec l'action conduite par l'Aviation civile et les exploitants d'aérodromes au niveau national (voir partie « Aéronefs »). Elles peuvent aussi probablement être en partie expliquées par l'optimisation des

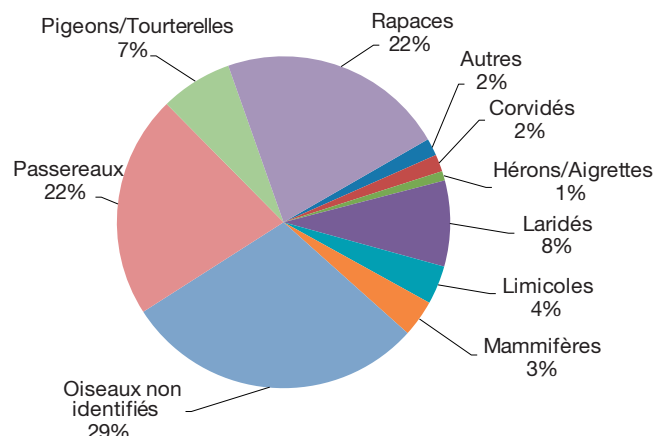


Fig. 4. — Répartition des collisions par taxons (période 2010-2019). Source : Service technique de l'Aviation civile (STAC).

procédures de recensement des collisions, surtout visibles pour les collisions sans dégâts.

Sur la période 2010-2019, la très grande majorité des collisions concerne des Oiseaux, notamment des rapaces (22 % des collisions) et des Passereaux (22 % des collisions) (Fig. 4). Les rapaces les plus touchés sont le Faucon crécerelle (*Falco tinnunculus* Linnaeus, 1758) (117 collisions/an), la Buse variable (*Buteo buteo* (Linnaeus, 1758)) (37 collisions/an) et la Chouette effraie (*Tyto alba* (Scopoli, 1769)) (13 collisions/an). Les Martinets noirs (*Apus apus* (Linnaeus, 1758)) sont aussi très touchés (64 collisions/an) ainsi que les Hirondelles (48 collisions/an) et l'Alouette des champs (*Alauda arvensis* Linnaeus, 1758) (20 collisions/an).

Cependant, ce suivi des collisions sous-estime la mortalité réelle des espèces liée aux aéronefs. En effet, toutes ne sont pas repérées et comptabilisées. Les collisions avec les Oiseaux causent les dégâts les plus visibles et sont donc de ce fait plus documentées, mais le recensement n'est pas exhaustif non plus pour les Oiseaux.

En ce qui concerne les Chauves-souris, en France, 69 collisions ont été enregistrées sur la période 2008-2017, soit environ sept collisions par an. Ces chiffres sont très probablement sous-estimés du fait de la petite taille des individus de ce groupe taxonomique, et de la difficulté à retrouver les cadavres.

Enfin, il faut noter que les aéronefs ne causent pas que des mortalités par collision. En effet, les perturbations subies par les Oiseaux varient selon la situation. L'effet perturbateur diminue à mesure que la hauteur de survol et l'écart horizontal augmentent. Le potentiel de perturbation augmente lorsque les aéronefs apparaissent de manière irrégulière et fortuite et qu'ils suivent des itinéraires variables. Selon les aéronefs, le niveau sonore émis constitue un facteur de perturbation supplémentaire, ainsi que le cisaillement de la masse d'air provoqué par les rotors d'aéronefs tels que les autogires et hélicoptères. Ce sont autant de facteurs qui peuvent avoir des conséquences sur les dynamiques de populations, notamment par le décantonnement des Oiseaux reproducteurs et l'échec des couvées (Orabi, comm. pers.).



Fig. 5. — Bâtiment vitré, en bord de Seine à Paris. Crédit photo : Vincent Vignon.

BÂTI

Problématique

Les études recensées, bien que peu nombreuses, indiquent que le bâti représente une source majeure de collisions pour les Oiseaux (Loss *et al.* 2014b, 2015). Globalement, toute construction peut être considérée comme une source de collision pour les Oiseaux. Ces derniers peuvent se heurter aux vitres des bâtiments, aux murs acoustiques (parapets vitrés de ponts ou en bordure d'infrastructures linéaires de transport) ou aux abris bus (Barton *et al.* 2017). Les phares, les piles de ponts, les tours de télécommunication ou encore les plateformes pétrolières en mer (Hüppop *et al.* 2016) engendrent également une mortalité aviaire.

Concernant les vitres, celles-ci sont effectivement très propices aux collisions à cause de la transparence du verre et du reflet de l'environnement sur celui-ci, qui font que l'animal ne voit pas l'obstacle et peut même être leurré sur la présence d'un milieu naturel à la place de la vitre. Le problème a probablement été décuplé ces dernières années par l'usage fréquent des vitres dans l'architecture moderne et le développement des « gratte-ciel », même si la situation en France n'est pas comparable avec celle d'autres pays dans lesquels ce type de construction est beaucoup plus fréquent (Fig. 5).

Toutes les espèces d'Oiseaux sont concernées par les collisions mais certaines caractéristiques augmenteraient le risque (par exemple le statut migrateur/sédentaire et les caractéristiques de déplacement diurne ou nocturne) (Sabo *et al.* 2016). Ce risque de collision est aussi fortement influencé par l'environnement et le type d'urbanisation (taille des bâtiments, proportion de surface de parois vitrées par bâtiment, densité d'urbanisation, dispositions des infrastructures par rapport aux axes principaux de déplacement et aux courbes de niveaux, milieux naturels autour susceptibles de se refléter, etc.) (Bracey *et al.* 2016; Hager *et al.* 2017). Le nourrissage hivernal par mangeoires favorise aussi probablement le risque de collisions en attirant les Oiseaux près des habitations (Zucca, comm. pers.). Différentes nuisances (lumineuses, sonores, etc.) sont également connues pour désorienter voire provoquer des collisions d'Oiseaux (Parkins *et al.* 2015). Dans le cas d'une étude menée aux États-Unis, la saison ne semble pas avoir d'effet (Hager & Craig 2014) mais ceci serait à tempérer si on considère que selon les saisons, les conditions météorologiques diffèrent et que certaines des saisons sont plus propices à des conditions de nébulosités défavorables ou à des événements climatiques exceptionnellement accidentogènes.



FIG. 6. — Martinet noir *Apus apus* (Linnaeus, 1758), oiseau migrateur transsaharien, trouvé mort sous une éolienne. Crédit photo : Mathieu Aubry.

Concernant les Insectes et les Chauves-souris, sur lesquels la littérature est plus lacunaire, leurs caractéristiques (repérage par écholocation pour les Chauves-souris, résistance aux chocs pour les Insectes du fait d'une moindre vitesse et de la résistance de leur carapace) peuvent laisser supposer que le phénomène est probablement plus limité. Néanmoins, la lumière artificielle semble être un facteur diminuant la capacité des Chauves-souris à détecter les obstacles (McGuire & Fenton 2010).

Quantification en France

Soulignons tout d'abord qu'il est très difficile de quantifier le nombre d'Oiseaux tués par des collisions avec le bâti pour différentes raisons (Riding & Loss 2018) telles que :

- la taille de la plupart des Oiseaux qui les rend difficiles à retrouver ;
- le délai limité de persistance des cadavres (nettoyage, prédation, écrasement, etc.) ;
- l'influence d'autres causes de mortalité comme la prédation par les chats domestiques en ville ;
- le fait que le choc puisse engendrer des lésions internes chez certains individus qui ne meurent pas sur le coup et sont donc de fait non comptabilisés.

En outre, les édifices publics comme privés sont concernés par des collisions mais ils sont souvent inégalement considérés dans les suivis (Orabi, comm. pers.). Les chiffres disponibles relèvent donc surtout d'estimations larges. Aux États-Unis,

il a été estimé qu'en moyenne 500 millions d'Oiseaux par an étaient tués par collision avec des vitres ou des immeubles (de 100 millions à 1 milliard) (Klem 1990 ; Erickson *et al.* 2005 ; Loss *et al.* 2014b, 2015). Au Canada, ce sont en moyenne 25 millions d'Oiseaux que l'on estime tués chaque année par collisions contre des vitres (de 16 à 42 millions) (Machtans *et al.* 2013). En France, le phénomène ne semble pas avoir été évalué du tout et les seules valeurs disponibles reposent sur l'activité associative. D'après la Ligue pour la protection des Oiseaux (LPO), sur 101 674 animaux accueillis en centres de sauvegarde LPO (moyenne annuelle sur l'ensemble des données 2014-2017 pour six centres de soin et sur 15 ans pour l'Île-Grande), 14 890 le sont suite à des collisions diverses (soit 15 %). En 2017, 200 sollicitations sont rapportées pour le seul accueil de la LPO Île-de-France et quatre centres de soins (Base de données Oisilys [<https://www.oisilys.org/>, dernière consultation le 30 juin 2020], Programme Faune en Détresse, LPO), sachant que de très nombreux Oiseaux qui ont heurté une vitre et qui sont identifiés par les particuliers n'arrivent pas en centre de soin (parce qu'ils sont morts ou reprennent leur envol).

En France, les grandes tours sont plus rares qu'en Amérique du Nord par exemple. De fait ce problème est potentiellement moins important chez nous. Des cas isolés existent mais aucune hécatombe n'est répertoriée à ce jour, comme c'est le cas pour des tours de télécommunication américaines.

ÉOLIENNES

Problématique

Contrairement aux éléments de bâti fixes évoqués précédemment, la spécificité des éoliennes est que leurs pales sont mobiles (le bout de la pale d'une éolienne peut se déplacer jusqu'à 300 km/h) ce qui, d'une part, rend leur perception difficile par la faune volante et, d'autre part, peut entraîner une mortalité supplémentaire sans nécessité d'un contact avec l'éolienne. En effet, en plus des collisions, les éoliennes peuvent provoquer chez certaines espèces des barotraumatismes, sous l'effet à distance des variations brutales de pression autour des pales qui causent des lésions pulmonaires mortelles (Grodsky *et al.* 2011).

Les collisions engendrées par les éoliennes touchent plutôt les Oiseaux (Liechti *et al.* 2013) (Fig. 6) alors que les Chauves-souris semblent davantage exposées au phénomène de barotraumatisme, à cause de la fragilité de leurs tissus (Baerwald *et al.* 2008). Par ailleurs, au-delà de cette mortalité directe par collision ou barotraumatisme, d'autres impacts potentiels existent sur les populations d'Oiseaux et de Chauves-souris, notamment l'altération voire la destruction d'habitats en phase de travaux et le dérangement en phase d'exploitation, qui peuvent se traduire par des échecs de reproduction ou des pertes nettes d'habitats et des modifications des domaines vitaux (Rees 2012 ; Itty & Duriez 2017), ou encore par l'effet barrière induit par les installations. Pour certaines espèces de Chiroptères une baisse de la fréquentation a été observée dans un rayon d'au moins 1000 m autour des éoliennes (Barré 2017).

Pour les Insectes, leur présence à hauteur des éoliennes est bien mise en évidence et le fait qu'elles puissent constituer des puits écologiques est une préoccupation croissante (Voigt

2021). Les suivis des parcs éoliens ont permis de mettre en évidence dans un certain nombre de cas des vols de Chiroptères à la poursuite d'Insectes s'élevant au niveau des nacelles en spirale autour des mâts et atteignant ainsi des hauteurs exceptionnelles. Cette agglutination d'Insectes sur les bords des pales est même aussi suspectée de diminuer le rendement énergétique (Corten & Veldkamp 2001 ; Wilcox & White 2016). Une étude a estimé par modélisation qu'environ 1,2 trillion d'Insectes étaient tués par an en Allemagne par collisions avec les éoliennes (Trieb 2018). L'attraction des Insectes pourrait être amplifiée la nuit par la lumière émise par les éoliennes, les Insectes nocturnes ayant un phototactisme positif (Long *et al.* 2011). Une étude sur le suivi du Parc de Castelnau-Pégayrol en Occitanie (suivi 2009-2011) a montré que des passages ponctuels de Chiroptères à basse altitude entraînaient, via des détecteurs de mouvement, l'allumage des lumières au-dessus des portes des tours. Cet allumage favorise le cantonnement des Insectes et des Chiroptères à leur poursuite. Lors de leur chasse, les Chiroptères ont dès lors tendance à suivre le repère constitué par la tour, vers le haut, en poursuivant les Insectes. Cet exemple démontre qu'il est nécessaire de limiter les facteurs d'attraction (éclairage, chaleur, interstices, etc.), y compris des infrastructures associées aux éoliennes.

Quantification en France

Concernant les Oiseaux, la LPO France a compilé et analysé 197 rapports de suivis réalisés entre 1997 et 2015 par des bureaux d'études et des associations naturalistes sur un total de 1065 éoliennes réparties sur 142 parcs français (Marx 2017). Le nombre de collisions constatées apparaît relativement faible au regard de l'effort de prospection mis en œuvre : 37 839 prospections documentées ont permis de retrouver 1102 cadavres d'Oiseaux. L'estimation de la mortalité réelle (prenant notamment en compte la durée de persistance des cadavres et le taux de détection) varie selon les parcs éoliens de 0,3 à 18,3 Oiseaux tués par éolienne et par an, résultats comparables à ceux obtenus aux États-Unis (5,2 selon Loss *et al.* 2013) ou au Canada (8,2 selon Zimmerling *et al.* 2013). Récemment, la LPO et l'Office français de la Biodiversité (OFB) ont publié conjointement une autre étude qui confirme ces résultats (Gaultier *et al.* 2019). À noter que ces chiffres ne tiennent pas compte de la probabilité de détection et du temps de disparition des cadavres, et sont donc fortement sous-estimés.

Les espèces les plus fréquemment retrouvées mortes sous les éoliennes sont les martinets et les Passereaux migrateurs (qui passent par centaines de milliers, principalement de nuit). Les rapaces diurnes (faucons, milans, busards, etc.), qu'ils soient sédentaires ou qu'ils passent à proximité des éoliennes en période de nidification, sont, en revanche, indéniablement les premières victimes des éoliennes au regard des effectifs de leurs populations (Duriez *et al.* 2017). Leur comportement en vol (faculté de manœuvre limitée en vol, stratégie de vol, chasse à proximité des éoliennes du fait de l'agglutination d'Insectes autour des pâles, etc.) les rend *a priori* extrêmement sensibles aux collisions. Les Grues cendrées (*Grus grus* (Linnaeus, 1758)) et les cigognes sont pour le moment relativement épargnées

en France (deux cas répertoriés de cigognes) mais elles sont retrouvées mortes en nombre ailleurs en Europe.

Cette mortalité peut souvent être mise en relation avec les enjeux avifaunes préexistant à proximité des éoliennes, avant l'installation du parc : zone Natura 2000, domaine vital de rapaces, importante voie de déplacement de l'avifaune, etc. Par ailleurs, l'impact réel de cette mortalité ne peut se réduire au nombre d'individus tués, il doit être relié à l'état de conservation des populations concernées (ex. : populations déjà fragmentées) et aux traits de vie des espèces tuées (par exemple les populations d'espèces longévives peuvent être fortement impactées par la disparition d'un nombre restreint d'individus).

En ce qui concerne les Chauves-souris, l'accord EURO-BATS a publié en 2015 un suivi des cas de mortalité de Chauves-souris dus aux éoliennes en Europe sur la base de diverses études (Rodrigues *et al.* 2015) et la Société française d'Étude et de Protection des Mammifères (SFEPM) a mis à jour ce tableau en 2016. Généralement, le taux de mortalité oscille entre 15 et 30 Chauves-souris tuées par éolienne et par an. Certains parcs peuvent tuer jusqu'à 90 individus par an avant mise en œuvre de mesures de réduction. Dans la mesure où les cadavres sont difficiles à retrouver au pied des éoliennes (petite taille des individus, prédation, accessibilité du terrain, etc.), ces valeurs sont très probablement sous-estimées (Besnard & Bernard 2017). En Allemagne, il a été estimé que plus de 250 000 Chauves-souris sont tuées par les éoliennes chaque année, ce qui équivaut à plus de deux millions de Chauves-souris tuées depuis ces dix dernières années, sans mesure de réduction (Voigt *et al.* 2015). Les espèces les plus touchées sont les espèces migratrices et des espèces avec des statuts de conservation préoccupants (Lehnert *et al.* 2014). La différence d'impacts des éoliennes varie très probablement en fonction de leur positionnement vis-à-vis des sites favorables aux Chiroptères, comme précédemment mentionné pour les Oiseaux. C'est pour cette raison que les diagnostics en amont de l'implantation des parcs d'éoliennes sont désormais systématiques et gagnent à être renforcés à grande échelle pour évaluer préalablement la présence d'enjeux chiroptérologiques ou aviaires importants et de ne pas équiper les sites où ces enjeux sont identifiés (Barré *et al.* 2018).

Nous n'avons pas trouvé de quantification précise concernant la mortalité des Insectes.

LIGNES ÉLECTRIQUES

Problématique

Les lignes électriques peuvent provoquer à la fois des collisions et des électrocutions chez les Oiseaux (Varret 2016). Aucune étude n'a été trouvée sur les Chauves-souris ni sur les Insectes documentant des collisions ou électrocutions contre des lignes électriques.

Les collisions surviennent le plus souvent avec les lignes « haute tension » (HT) et « très haute tension » (THT), mais parfois aussi avec le réseau « moyenne tension » (MT) et « basse tension » (BT). Les Oiseaux peuvent aussi s'électrocuter lorsqu'ils se posent sur les poteaux (reposer, perchoir ou choix de site de nidification)

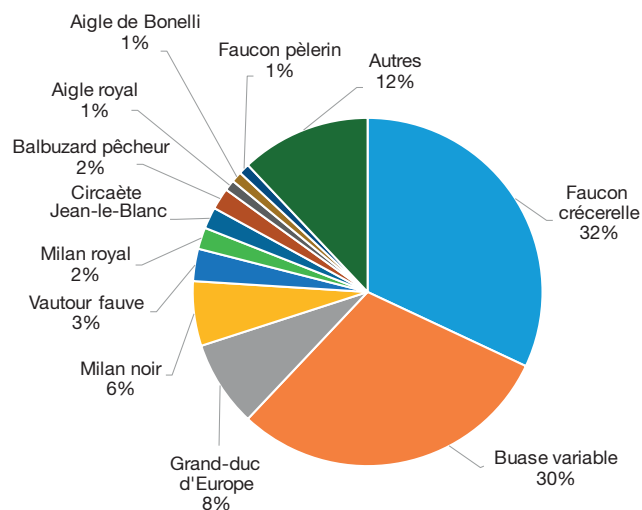


Fig. 7. — Proportion de rapaces touchés par le réseau électrique aérien (Varret 2016).

ou, pour les grands voiliers (rapaces, cigognes et grues), lorsqu'ils touchent deux conducteurs (fils électriques, armements métalliques sur les poteaux, etc.). Les électrocutions ont lieu le plus souvent sur des ouvrages MT ou BT (lignes ou poteaux). Ceci est possiblement à corrélérer avec l'espacement étroit de ces lignes et armements (Orabi, comm. pers.). Cependant, des électrocutions ont lieu parfois aussi sur le réseau HT avec certaines configurations de pylônes. La Figure 7 montre qu'en France, les rapaces les plus touchés par le réseau électrique aérien seraient le Faucon crécerelle (32 %) et la Buse variable (30 %). Il s'agit des deux espèces de rapaces les plus courantes en France, donc ces chiffres ne sont pas surprenants. En revanche, la proportion significative (8 %) concernant le Hibou Grand-Duc (*Bubo bubo* (Linnaeus, 1758)) est plus inquiétante car cette espèce est plus rare. Notons aussi que ces chiffres proviennent d'une synthèse réalisée en France sur des données de mortalité opportunistes récoltées par des naturalistes, dans laquelle certaines régions ne sont pas représentées et d'autres sont au contraire surreprésentées. Ils sont donc à examiner avec beaucoup de précautions mais ils donnent toutefois un aperçu de la situation.

Plusieurs facteurs influencent le risque d'interaction aviaire avec les réseaux électriques. Il existe des facteurs propres aux espèces (morphologie des espèces, comportement, manœuvrabilité en vol, capacités de navigation) (Janss 2000) et des facteurs externes qui peuvent concerner à la fois les caractéristiques des lignes électriques (configuration des lignes, nombre de nappes de câbles, présence d'un câble de garde, poteau relié à la terre ou non) (Tintó *et al.* 2010) et les paramètres environnementaux. Parmi ceux-ci on peut citer l'abondance des proies (le nombre de rapaces électrocutés augmente à mesure que le nombre de proies augmente), la structure et couverture de végétation (qui peut affecter l'accessibilité des proies et *a fortiori* la performance de chasse des prédateurs) ainsi que les conditions météorologiques (vent, pluie, brouillard) qui peuvent avoir une influence notable sur les performances de vol (dérive des trajectoires, détérioration de la portance), les capacités à anticiper les obstacles ou le niveau d'exposition

(l'humification du plumage des grandes espèces augmente les risques d'électrocution). L'oiseau va être exposé à un risque de collision plus ou moins fort – et que l'on ne sait pas hiérarchiser à ce jour – selon qu'il effectue des déplacements journaliers entre des zones de reposoirs et des zones d'alimentation, des déplacements migratoires ou des mouvements de dispersion juvénile. Le rôle respectif et l'importance relative de chacun de ces facteurs pour évaluer le risque qu'un oiseau entre en collision avec une ligne électrique n'ont cependant pas pu être scientifiquement évalués à ce jour (Bernardino *et al.* 2013). Il y a en effet peu de suivis réalisés en raison de la densité des réseaux électriques en France et des coûts liés au grand nombre de passages nécessaires pour évaluer correctement la mortalité.

Quantification en France

Les estimations de la mortalité par collision ou électrocution sont très imprécises parce qu'il existe des biais tels que le taux de détection des Oiseaux morts, la rapidité de dégradation et de consommation des cadavres par des charognards (Rioux *et al.* 2013). En effet, ces biais sont difficiles à estimer et à généraliser car ils varient d'un site à un autre et sont soumis à des fluctuations saisonnières (Borner *et al.* 2017). De plus, comme pour le bâti, les Oiseaux peuvent être blessés à la suite d'une collision avec un effet léthal différé et le lieu de découverte ne correspond pas forcément au lieu de collision, mais ces cas sont peu connus et rarement inclus dans les estimations. Les incertitudes subsistant à ce jour sur le rôle et l'importance des différents facteurs impliqués dans les collisions aviaires avec les lignes électriques et sur l'amplitude de cet impact sont intrinsèques aux méthodes utilisées et à l'absence de standardisation des protocoles.

À notre connaissance, il n'existe pas d'estimation du nombre d'Oiseaux tués par les lignes électriques en France. La surveillance toxicologique réalisée par la LPO France et son réseau de partenaire révèle que près de 12 % des rapaces découverts sont victimes d'électrocutions et de percussions avec les réseaux de câbles (électriques ou de transport). La mortalité de vautours bagués sur le réseau électrique en France depuis 1981 jusqu'en 2018 représente 87 Oiseaux. Une thèse financée par le Réseau de transport d'électricité (RTE) a été réalisée sous la direction du Muséum national d'Histoire naturelle et du Centre d'Écologie fonctionnelle et évolutive (CEFE-CNRS) afin de proposer un cadre méthodologique pour le suivi des interactions des Oiseaux avec les lignes électriques et la quantification des collisions en tenant compte de ces biais (Borner 2016). Cette thèse a, entre autres, produit une cartographie du risque d'interaction des Oiseaux avec le réseau de transport d'électricité en France.

Aux États-Unis, une étude a estimé qu'entre 12 et 64 millions d'Oiseaux étaient tués chaque année par les lignes électriques : entre 8 et 57 millions par collision et entre 0,9 et 11,6 millions par électrocution (Loss *et al.* 2014a). Au Canada, les évaluations sont comprises entre 1 et 229,5 millions d'Oiseaux morts par an et une étude conclut à une mortalité entre 2,5 et 25,6 millions sur l'ensemble du Canada (231 966 km de lignes de transport d'électricité, principalement situées en forêt boréale), en prenant en compte les différents biais et la variation du risque (Rioux *et al.* 2013).

TABLEAU 1. — Synthèse des enjeux par obstacle, en l'état des connaissances. Les chiffres donnés pour le Canada et/ou les États-Unis sont purement indicatifs, afin de montrer que des démarches d'estimations existent ailleurs. Ils n'ont pas valeur de comparaison avec la France dans la mesure où les contextes sont très différents. Les parenthèses pour certains groupes taxonomiques signifient que ceux-ci sont concernés de manière moins prioritaire.

Types d'obstacle	Mortalité rencontrée	Groupes biologiques concernés (selon les connaissances disponibles)	Quantification/Estimation du phénomène en France
Aéronefs	Collision	Oiseaux	Sur 2010-2019, 8709 collisions animales dont 7,8 % sérieuses et 3 % avec dommages (Source : STAC)
Bâti	Collision	Oiseaux (Chauves-souris, Insectes)	Non trouvée Estimation USA : en moyenne 500 millions d'Oiseaux tués par an (et jusqu'à 1 milliard) (Klem 1990 ; Erickson <i>et al.</i> 2005 ; Loss <i>et al.</i> 2014b, 2015) Estimation Canada : en moyenne 25 millions d'Oiseaux tués par an (de 16 à 42 millions) (Machtans <i>et al.</i> 2013)
Éoliennes	Collision et barotraumatisme	Oiseaux, Chauves-souris, (Insectes)	Oiseaux : jusqu'à 18 oiseaux tués par éolienne et par an, avec une moyenne à sept (Marx 2017 ; Gaultier <i>et al.</i> 2019) Chauves-souris : jusqu'à 50 (voire 90) Chauves-souris tuées par éolienne et par an (SFPEM, 2016 [Rodrigues <i>et al.</i> 2015]). Estimation Allemagne : 250 000 Chauves-souris tuées par les éoliennes chaque année (Voigt <i>et al.</i> 2015)
Lignes électriques	Collision et électrocution	Oiseaux	Non trouvée Estimation USA : 12 à 64 millions d'Oiseaux tués par an (Loss <i>et al.</i> 2014a) Estimation Canada : 2,5 à 25,6 millions d'Oiseaux tués par an (Rioux <i>et al.</i> 2013)

DISCUSSION ET PERSPECTIVES

Les obstacles aériens sont clairement une source de mortalité importante pour la faune volante. Cette mortalité n'est pas uniquement due à des collisions mais peut aussi résulter d'électrocutions (lignes électriques) ou de barotraumatisme à courte distance (éoliennes) (Tableau 1). En revanche, la quantification de ces problèmes reste très variable entre les différents obstacles. En France, elle est globalement mal connue à l'exception des aéronefs – même si cela reste à relativiser car tous les accidents ne font pas l'objet d'une déclaration, notamment lorsqu'il est question de l'aviation civile motorisée ou non – et, dans une moindre mesure, des éoliennes. En revanche, des estimations même larges existent ailleurs, par exemple aux États-Unis ou au Canada pour le bâti et les lignes électriques. De plus, dans la plupart des cas, les suivis ne donnent que des valeurs absolues sans les rapporter aux effectifs des populations, ce qui ne permet pas d'appréhender l'impact réel de ces collisions/électrocutions sur la démographie des populations concernées.

Enfin, lors de l'évaluation des impacts potentiels et effectifs sur la faune, il est important de prendre en compte non seulement les infrastructures concernées, mais également toutes les installations connexes et annexes (ex. : routes, etc.). Les impacts peuvent être temporaires ou permanents, sur site ou hors site, cumulatifs et peuvent entrer en jeu à différents moments du cycle des installations (par exemple pendant les phases de construction, de rénovation, d'entretien et/ou de démantèlement). Tous ces facteurs devraient être pris en considération.

Enfin, rappelons que cet article se focalise sur quatre grands types d'obstacles aériens mais qu'il en existe d'autres, tels que les grands ouvrages de franchissement à câbles de type viaducs

ou également les câbles de débardage de bois, de téléski et de téléphériques qui génèrent également des collisions. Par exemple, une étude sur 252 domaines skiables a été effectuée entre 2000 et 2004 et a recensé environ 240 cas d'Oiseaux morts à cause de câbles des télésièges, de télécabines et de téléphériques (Maillard 2009). À Saint-Denis de la Réunion où un projet de téléphérique est en cours (<https://telepherique-urbain.cinor.org/>, dernière consultation le 18 juin 2021), de forts risques de collisions avec les câbles et les cabines ont été soulevés, notamment pour les Oiseaux marins, et ont motivé une évaluation environnementale. Ces problématiques liées aux câbles devraient donc aussi être intégrées pleinement à la réflexion proposée ici, d'autant que de nombreux projets de transports par téléphérique urbain se développent actuellement (ex. : Créteil, Grenoble). En Île-de-France treize projets sont à l'étude ; le plus avancé est celui du Téléal, long de 4,5 km, qui reliera Créteil à Villeneuve-Saint-Georges (Val-de-Marne) (<https://www.valdemarne.fr/vivre-en-val-de-marne/informations/televal-un-telepherique-en-val-de-marne>, dernière consultation le 18 juin 2021).

UNE PRISE EN COMPTE AMORCÉE MAIS INSUFFISANTE

DES MESURES DE GESTION D'OBSTACLES À L'EFFICACITÉ VARIABLE

Des mesures de gestion sont d'ores et déjà mises œuvre ou testées pour limiter les impacts de ces différents obstacles. En revanche, l'ancienneté et l'opérationnalité de ces mesures sont très variables selon les types d'obstacles, les organismes

qui les gèrent et leur efficacité n'est pas toujours facilement évaluable. En outre, les mesures de suppression et réduction des impacts sont très rarement l'objet de suivi et d'évaluation de leur efficacité. Lorsque des suivis sont réalisés, ils sont rarement l'objet de protocoles partagés et le transfert des expériences reste très limité.

Aéronefs

Le suivi des collisions faune/aéronefs est une préoccupation ancienne : les États membres de l'Organisation de l'Aviation civile internationale (OACI) sont invités à signaler tous les impacts d'Oiseaux enregistrés dans le monde depuis 1979. Une base de données centralise tous les accidents notifiés entre avions et Oiseaux depuis le début du ^{xx}e siècle (<https://avisure.com/wp/serious-accident-database/>, dernière consultation le 10 mai 2022). En France, la lutte contre le risque aviaire est réglementée depuis plus de 30 ans (juillet 1989) et un décret de 2007 prévoit que les impacts d'animaux doivent être notifiés au plan national ; une plateforme en ligne a été développée pour cela par le Service technique de l'Aviation civile (STAC) (base de données nationale PICA [<https://www.stac.aviation-civile.gouv.fr/picaweb/login/auth>, dernière consultation le 10 mai 2022]). En 2014, l'Europe, à travers le règlement (UE) n°139/2014, a aussi publié de nouvelles règles dans ce domaine en introduisant notamment des exigences en matière de surveillance des abords des aéroports et de gestion du risque animalier. Ces exigences ont été reprises par la réglementation nationale.

Depuis 2009, les aéroports d'intérêt national en France ont été dotés d'un service de prévention du péril animalier chargé de mettre en œuvre les méthodes d'effarouchement (par exemple quinze agents à Roissy et onze à Orly exclusivement occupés à cette tâche) (<https://www.stac.aviation-civile.gouv.fr/fr/securite-aerodromes/risque-animalier>, dernière consultation le 10 mai 2022).

Des actions préventives sont aussi mises en place pour réduire l'attractivité des aéroports pour les espèces animales jugées dangereuses pour la sécurité aérienne (via un aménagement, une réduction voire une suppression des habitats favorables – tels que les mares ou les arbres pouvant servir de perchoir – ou du site de nidification précisément). Ces actions préventives n'ont pas toujours des résultats immédiats et il est donc nécessaire de les combiner à des actions curatives.

Pour ces actions curatives, des méthodes et moyens d'effarouchement ont été développés : tirs de fusée détonante ou crépitante, tirs d'effarouchement, effarouchements sonores ou lumineux (torches laser, imitations de cris de détresse, etc.). Ces dispositifs sont régulièrement renouvelés et souvent combinés différemment pour éviter l'accoutumance des populations aviaires locales. Des fauconniers sont aussi utilisés sur certains aéroports militaires et civils et des dispositifs d'alerte couplés à un radar aviaire à détection existent sur certains aéroports internationaux. Les effarouchements par chiens sont également utilisés sur plusieurs aéroports internationaux et testés à Marseille.

Enfin, une élimination physique par tir à la carabine ou au fusil de chasse est une solution envisagée en dernier recours

lorsque la sécurité aérienne est engagée et lorsque aucun moyen d'effarouchement n'a donné de bons résultats. Parmi les espèces les plus prélevées en France, on retrouve notamment les Goélands, mais ces prélèvements peuvent aussi concerner des espèces à forts enjeux de conservation. Par exemple, suite à l'obtention d'une dérogation à destruction d'espèces protégées, 72 Outardes canepetières *Tetrax tetrax* (Linnaeus, 1758) ont été prélevées à l'aéroport de Marseille de 2013 à 2016 (Direction départementale des Territoires et de la Mer 2016) ; de 2017 à 2019 aucun prélèvement n'a été effectué, notamment grâce aux suivis et moyens d'effarouchement et de gestion des habitats mis en place permettant de mieux maîtriser le risque animalier (Villers 2019). Toutefois, les risques de collision ne se limitent pas aux abords des pistes de décollage et d'atterrissage (par exemple la zone entre 300 et 500 m au dessus du sol présente une sensibilité majeure en cas de colonies de grands rapaces).

En conclusion, nous pouvons noter que les mesures mises en place concernant le « risque aviaire » visent avant tout à limiter les risques de dommages physiques aux équipages, aux passagers, aux tiers, aux biens et au matériel volant. Ces mesures ne visent pas prioritairement à réduire les impacts négatifs sur la faune sauvage. Cette approche fondamentalement différente nécessite d'être soulignée car les résultats obtenus ne répondent pas tout à fait aux mêmes objectifs. Des points de convergence doivent être recherchés afin que les préconisations qui pourraient être formulées bénéficient réciproquement à la faune sauvage et à la sécurité des personnes et des biens.

Bâti

Concernant le bâti, les préoccupations sont plus récentes et à ce jour les mesures restent assez limitées, ce qui est étonnant compte tenu de l'ancienneté de ce problème et des surfaces concernées. Ce problème ne semble pas être pris en charge institutionnellement, que ce soit à l'échelle nationale en France ou aux échelles internationale ou européenne. De leur côté les associations sensibilisent sur le sujet et des guides/plaquettes ont été produits (Biber 1998 ; Hilke 2000 ; ASPAS 2010 ; Schmid *et al.* 2008).

La principale action déployée pour diminuer les collisions des Oiseaux sur les surfaces vitrées est la pose d'autocollants sur les vitres. Généralement il s'agit de silhouettes d'Oiseaux mais leur réelle efficacité est controversée (Schmid *et al.* 2008 ; Brown *et al.* 2019) alors que des bandes verticales offraient de bons résultats (Biber 1998 ; Elmiger & Trocmé 2007 ; Rössler *et al.* 2015). Quelle que soit leur forme, c'est le fait de matérialiser l'obstacle qui est important, en rendant la vitre visible (Fig. 8). Ce but peut donc aussi être atteint en amont (construction de l'édifice), par la mise en place de vitres opaques, colorées ou peu réfléchissantes. Une étude récente a par exemple montré que des vitres sales ou présentant des graffitis limitaient le risque de collisions sur des abris bus (Zysk-Gorczyńska *et al.* 2020). La surface à recouvrir n'est pas nécessairement l'ensemble de la surface vitrée et semble dépendre de l'environnement à proximité de la vitre qui peut provoquer des reflets (de végétation, du ciel, etc.) (Rebolo-

Ifrán *et al.* 2019). Toutefois, les espèces habituées à évoluer dans les frondaisons peuvent se glisser entre deux autocollants de vitre (Orabi, comm. pers.). L'extinction des lumières à l'intérieur des bâtiments apparaît aussi comme une mesure indispensable pour éviter les collisions à partir de la tombée de la nuit en raison de l'attractivité de la lumière pour de nombreuses espèces.

Au final, sur ce sujet du bâti vitré, il semble que tout reste à penser ou presque pour limiter ses conséquences sur la biodiversité. Il serait important aussi de former davantage les architectes et les « designers » d'immeubles à cette problématique.

Éoliennes

En ce qui concerne les éoliennes, quelques techniques en développement visent à réduire les impacts mais là non plus elles ne sont pas totalement satisfaisantes, notamment en raison de la complexité des facteurs influençant le risque de collision (Marques *et al.* 2014). Pour les Oiseaux, des systèmes d'effarouchement (souvent par émissions sonores), basés sur une détection automatisée et en temps réel de la faune volante, sont développés et testés depuis quelques années (Robinson Willmott *et al.* 2015). L'efficacité réelle de ces dispositifs est encore en cours d'évaluation. Une étude suisse a déjà été publiée et conclut à une efficacité mitigée et variable selon les espèces et les sites (Hanagasioglu *et al.* 2015). Plusieurs problèmes persistent avec ces dispositifs : la présence d'angles morts, la portée limitée des caméras, les problèmes de contre-jour et de ciels « complexes » ou « mouvants », les pannes ou encore l'impossibilité de fonctionnement de nuit ou par temps de brouillard. Sur le long terme, les animaux pourraient s'accoutumer au signal sonore émis et rendre ces systèmes inefficaces. Dans certains sites une mortalité préoccupante reste donc constatée malgré ces systèmes.

Une mesure de réduction relativement efficace consiste à arrêter les éoliennes lors des périodes favorables à une forte activité des espèces cibles. Ce procédé, mis en œuvre d'abord à titre expérimental aux États-Unis, au Canada et en Europe (par exemple en 2019 au Portugal pour tenir compte d'enjeux liés aux Vautours, Orabi, comm. pers.) a fait ses preuves pour les Chauves-souris et il tend aujourd'hui à se généraliser en France (Beucher *et al.* 2017). Lorsque le dispositif est correctement configuré, les taux de mortalité peuvent en être diminués d'au moins 50 % et parfois même de 90 % (Smallwood & Bell 2020). Aujourd'hui, cette technique est de plus en plus proposée pour réduire le risque de collision des espèces d'Oiseaux patrimoniales. Pour les Grues cendrées, par exemple, un protocole a été défini en Bourgogne-Franche-Comté afin de déterminer les conditions de mise à l'arrêt et de redémarrage des éoliennes lors de forts passages migratoires coïncidant avec des conditions météorologiques défavorables. Dans certains parcs, les éoliennes sont aussi mises à l'arrêt lorsque des opérations agricoles susceptibles d'attirer des rapaces (fauches notamment) se déroulent à proximité (200 à 300 m généralement), et pendant une période allant de un à trois jours, ce qui constitue une mesure intéressante même si elle est délicate à mettre en œuvre et à contrôler. Aussi, la hauteur des pales – qui semble modulable – a un rôle important



Fig. 8. — Vitres d'un pont ornées de motifs permettant d'augmenter leur visibilité. Crédit : Volgelwarte.ch / ASPAS.

et une synthèse bibliographique sur les hauteurs moyennes d'occupation de l'espace aérien par les différentes espèces est souhaitable. Le fait de peindre les pâles des éoliennes pourrait être une solution pour les rendre plus visibles et donc moins accidentogènes. En utilisant un protocole robuste de type « Before-After-Control-Impact », des chercheurs norvégiens ont constaté une baisse de 70 % de mortalités d'Oiseaux lorsque l'une des pâles est noire (May *et al.* 2020).

Enfin, diverses solutions de génie écologique visant à rendre le parc éolien moins attractif pour des espèces cibles tout en s'assurant de solutions de repli à proximité sont régulièrement étudiées (May *et al.* 2015). Il est ainsi possible de faire en sorte que le pourtour des éoliennes ne devienne pas un terrain de chasse favorable aux grands rapaces. Toutefois, lorsque les éoliennes ont été implantées dans l'espace vital d'une espèce sensible, cette mesure a pour effet de provoquer une perte d'habitat. Dans un contexte incitatif de développement de l'éolien, ce type de mesure peut donc accroître significativement le phénomène de disparition et de dégradation des habitats.

Devant la perfectibilité des différentes mesures citées ci-dessus, la planification, c'est-à-dire la préservation des sites d'importance pour les Oiseaux et les Chiroptères, demeure la principale mesure qui devrait être déployée pour réduire l'impact des éoliennes sur les espèces volantes (Rehbein *et al.* 2020).

Lignes électriques

L'enfouissement des lignes, lorsqu'il est possible, reste la meilleure option pour supprimer totalement le risque de conflit avec la faune aérienne. Lorsque la ligne est maintenue en aérien, la limitation des risques d'électrocution s'avère plus facile à mettre en œuvre que l'atténuation des risques de collision. Pour les premiers, il suffit par différents dispositifs d'interdire l'accès des conducteurs électriques aux Oiseaux. La limitation des risques de collision nécessite quant à elle des moyens plus conséquents car elle repose sur de l'ingénierie qui vise globalement à effacer l'obstacle que représentent les réseaux de lignes sur la trajectoire des Oiseaux en les rendant



FIG. 9. — Ligne électrique traversant un paysage agricole en Ile-et-Vilaine. Crédit : Romain Sordello.

soit plus visibles, soit moins attractives, ou encore en modifiant ou supprimant leurs tracés.

Plus précisément, en ce qui concerne les risques d'électrocutions des Oiseaux, il existe trois grandes manières de les réduire :

- dissuader les Oiseaux de se poser à l'aide de « cierges » ou autres dispositifs hostiles. Ces dispositifs sont surtout efficaces lorsqu'ils sont oscillants et placés en oblique ;
- neutraliser ou isoler les lignes par des gaines isolantes par exemple. D'autres systèmes (capuchons, protections, etc.) permettent d'isoler des matériels tels que les transformateurs sur poteaux et des armements ;
- inciter les Oiseaux à se poser ailleurs sur des perchoirs plus attractifs que les armatures. Des perchoirs positionnés au-dessus des conducteurs fournissent aux Oiseaux des points d'observation plus élevés et une plus grande facilité d'accès. L'environnement, mais surtout la nature, la forme et la position de ces perchoirs les rendent plus ou moins efficaces. Par ailleurs, il est nécessaire de compléter leur installation par une gaine isolante car certains Oiseaux se posent tout de même sur l'armement et s'électrocutent.

En ce qui concerne le risque de collision, des dispositifs sont installés depuis le début des années 1990 sur les ouvrages existants et en construction (Fig. 9), tels que l'avertissement visuel ou l'effarouchement visuel. L'avertissement visuel passe par des spirales ou balises d'aviation colorées qui sont disposées sur le tronçon d'ouvrage (conducteur ou câble de garde). Elles ont pour objectif de rendre les câbles plus visibles afin de permettre un évitement par les Oiseaux mais leur efficacité, à notre connaissance, n'a pas ou très peu été évaluée. Des balises blanches et rouges sont posées en alternance sur les câbles : rouges pour les Oiseaux à activité diurne, blanches pour les Oiseaux à activité crépusculaire. En France, des balises dites « avisphères » ont récemment été développées et sont le fruit d'une collaboration entre RTE et la LPO, au sein du Comité national Avifaune (CNA). Formées de deux demi-sphères, l'une de couleur rouge, l'autre de couleur blanche, elles sont photoluminescentes (Borner 2016). Les spirales (ou queues

de cochon), par le léger sifflement qu'elles émettent lorsque le vent souffle, agissent également comme un avertissement sonore perceptible par l'ouïe fine de certains Oiseaux. L'effarouchement visuel se concrétise par des effigies de rapaces mises en place en haut des pylônes pour effrayer certaines espèces d'Oiseaux.

Les études évaluant l'efficacité de ces dispositifs sont peu nombreuses mais certaines menées à l'étranger (Drewitt & Langston 2008 ; Avian Power Line Interaction Committee 2012 ; Barrientos *et al.* 2012) montrent une réduction du nombre de collisions après marquage de la ligne de 50 à 80 % (Jenkins *et al.* 2010). Néanmoins, les systèmes utilisés en France sont souvent différents et il est donc difficile d'extrapoler ces évaluations. En outre, celles-ci se fondent rarement sur des études expérimentales et robustes avec un protocole de type « Before-After-Control-Intervention » (BACI). Ce type de protocole expérimental nous semble être de plus en plus urgent à mettre en place de façon systématique.

L'enfouissement des lignes, que ce soit pour réduire le risque d'électrocution ou de collision, est également une possibilité. Il s'agit de la mesure de réduction des interactions entre Oiseaux et lignes électriques la plus efficace puisqu'elle supprime la fragmentation de l'espace aérien. Dans les zones identifiées à fort risque, ce type de mesure pourrait être mis en place pour créer de véritables « réserves » aériennes (c'est-à-dire sans ou avec extrêmement peu d'obstacles aériens) comme cela a été réalisé en région PACA dans le cadre du SRCE et la protection de l'Aigle de Bonelli (*Aquila fasciata* Vieillot, 1822) ou du Gypaète barbu (*Gypaetus barbatus* (Linnaeus, 1758)) dans le cadre du LIFE GYPCONNECT.

Enfin, notons qu'une approche par anticipation est nécessaire dans la réduction des menaces. En effet, dans le cas d'espèces menacées avec de faibles effectifs, toute perte d'individu peut avoir des impacts conséquents voire irréversibles sur une population. Le fait d'intervenir en réaction après le constat de mortalités est un progrès remarquable mais qui peut s'avérer trop tardif.

En conclusion, on constate que parmi ces mesures de diminution du risque de collisions, certaines ne sont pas totalement efficaces tandis que d'autres comportent des contreparties économiques (baisse de la production d'énergie notamment). Notons cependant que l'inaction a elle aussi un coût puisque par exemple les accidents entre l'avifaune et les lignes électriques peuvent engendrer des coupures d'alimentation, ce qui a des conséquences sur le service rendu par le fournisseur d'énergie.

Par ailleurs, parmi le panel de mesures proposées, on retrouve très souvent l'objectif de dégrader l'habitat afin d'éviter la fréquentation par les animaux. Si ces mesures permettent effectivement une réduction de la mortalité directe, elles se traduisent par une perte et une fragmentation accrues de l'habitat à proximité de ces infrastructures alors que les aires de répartition de nombreuses espèces sont d'ores et déjà de plus en plus réduites et morcelées. L'objectif étant de rétablir une trame aérienne sans rupture, cette mesure ne fait au contraire qu'amplifier la fragmentation des habitats. Une approche par anticipation devrait donc déjà être

impérativement favorisée afin d'éviter autant que possible l'implantation de ces structures-obstacles dans les zones présentant des enjeux forts de biodiversité par une bonne mise en œuvre de la démarche.

Par exemple, une mesure de bon sens est que les projets éoliens ne devraient pas être pensés perpendiculairement à l'axe de déplacement des Oiseaux et leur emprise par rapport à cet axe limitée au maximum. Des espaces suffisants devraient également être préservés entre deux parcs éoliens voisins pour laisser des «corridors aériens» libres d'obstacles (Deschatres *et al.* 2010). Il faut aussi considérer que dans certains cas, il vaut probablement mieux, à titre de mesures compensatoires de l'implantation d'équipements, obtenir la création autour de ces derniers, de zones favorables à certaines espèces en forte diminution (Alouette des champs *Alauda arvensis* Linnaeus, 1758 par exemple) même si quelques cas de mortalité peuvent être constatés.

Notons ici que la Convention sur les espèces migratrices (CMS, à laquelle l'Outarde canepetière a été ajoutée aux annexes 1 et 2 lors de la COP de février 2020), placée sous l'égide de l'ONU et dont la France fait partie, a identifié la problématique des obstacles aériens et édité des recommandations, dont certaines sont spécifiques aux parcs éoliens (en 2017) et aux lignes électriques (en 2019).

UNE PRISE EN COMPTE LIMITÉE DANS LA TRAME VERTE ET BLEUE

Actuellement, la Trame verte et bleue en tant que politique publique nationale reste lacunaire concernant la prise en compte des espèces volantes et la gestion des obstacles aériens. Au sein des «Orientations nationales de la Trame verte et bleue» (ONTVB), cette problématique aérienne est évoquée pour les objectifs et les enjeux, par exemple concernant les axes migratoires et les zones de halte (MTES 2014). Les ONTVB incluent également une carte des voies de migrations de l'avifaune d'importance nationale (Fig. 10) à prendre en compte par les régions dans les SRCE et les Sradet. En revanche, la notion d'obstacle ne prévoit pas explicitement la possibilité qu'ils soient situés dans la colonne d'air. Les ONTVB, de même que le Code de l'environnement (art. R371-27), ne demandent pas non plus l'identification d'une trame ni d'une sous-trame aérienne, alors même qu'il paraît difficile de s'en affranchir concernant les espèces volantes.

Pour autant, cette problématique a parfois déjà été prise en compte au niveau des schémas régionaux de la TVB.

On peut mentionner tout d'abord le schéma TVB de la Réunion qui comporte une cartographie de la Trame aérienne et des obstacles correspondants (lignes électriques, transports par câble, ponts et éoliennes) (DEAL Réunion 2014). C'est l'exemple le plus explicite que nous connaissons.

En métropole, les diagnostics de certains SRCE comprennent des éléments sur les axes de déplacements des espèces aériennes (ex. : voies de migrations des Oiseaux à l'échelle régionale) et sur les réseaux d'infrastructures aériennes constituant des sources potentielles d'obstacles (Sordello *et al.* 2017). Par exemple, dans le SRCE Rhône-Alpes (page 82 ; Fig. 11), une carte des obstacles aériens localise les tronçons de voie ferrée

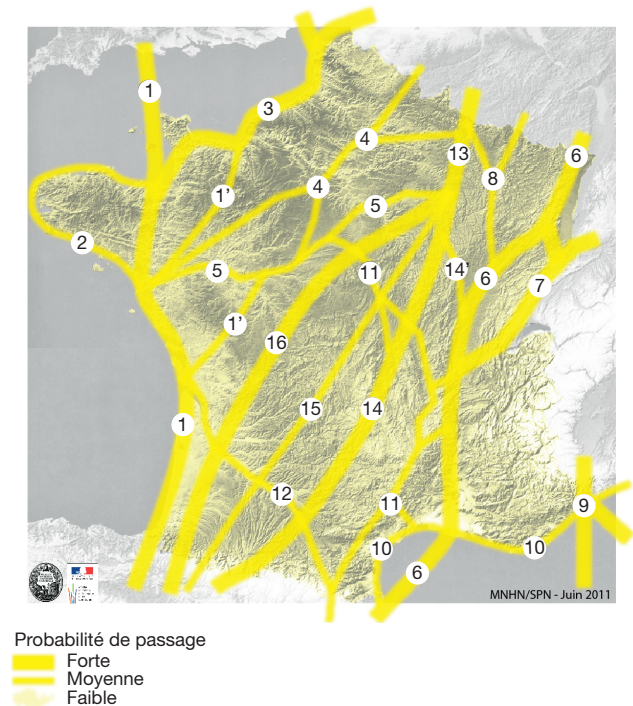


FIG. 10. — Carte des voies de migration d'importance nationale intégrée aux «Orientations nationales de la Trame verte et bleue» (ONTVB). Illustration des voies d'importance nationale de migrations de l'avifaune pour la cohérence nationale de la trame verte et bleue. Cette illustration, compte tenu de l'échelle nationale et du type de représentation retenue, ne doit pas être interprétée de manière stricte et ne peut justifier la mise en place de mesures réglementaires. Les apostrophes après les numéros de certaines voies indiquent des continuités secondaires rattachées aux principales. 1, littoral atlantique, traversée de la Bretagne puis de la Manche jusqu'à l'Angleterre; 2, littoral breton comme crochet de l'axe majeur 1; 3, poursuite de l'axe 1 le long du littoral de la Manche puis vers le nord de l'Europe; 4, axe nord-ouest/nord-est reliant l'embouchure de la Loire à la Belgique; 5, cours de la Loire jusqu'à Orléans rejoignant ensuite la Seine; 6, axe reliant la péninsule ibérique et la frontière franco-allemande, par la Méditerranée, le couloir rhodanien et les contreforts du Jura; 7, décroché de la continuité 6 par le bassin lémanique; 8, voie secondaire à la continuité 6 rejoignant directement le nord; 9, voie en provenance de Méditerranée et de la Corse; 10, littoral méditerranéen reliant l'Espagne à l'Italie; 11, axe depuis les Pyrénées orientales jusqu'à Orléans; 12, axe Pyrénées orientales/Estuaire de la Gironde; 13, axe Europe du nord/France; 14, axe nord-est/sud-ouest passant par le sud du massif Central; 15, axe nord-est/sud-ouest passant par le centre du massif Central; 16, axe nord-est/sud-ouest passant par le nord du massif Central. Source: Sordello *et al.* 2011.

électrifiés, les lignes électriques et les remontées mécaniques (présentées en fonction du risque de mortalité qu'elles occasionnent). Les ouvrages de production d'énergie (éoliennes et champs photovoltaïques) sont aussi cités par plusieurs SRCE.

Par ailleurs, certains SRCE ont aussi pris en compte la dimension aérienne lors de l'identification des obstacles aux continuités écologiques (Vanpeene *et al.* 2017). Par exemple, plusieurs SRCE mentionnent les lignes électriques comme source de fragmentation (Alsace, Auvergne, Champagne-Ardenne, etc.). Le projet de SRCE Nord-Pas-de-Calais présente une carte des continuités écologiques non terrestres où les lignes HT aériennes sont identifiées comme des éléments de fragmentation. Dans cette région, des zones de conflits importantes ont été matérialisées aux intersections entre les lignes électriques à haute tension de la «BD Carto» de l'IGN et les principales voies de déplacement des Oiseaux identifiées.

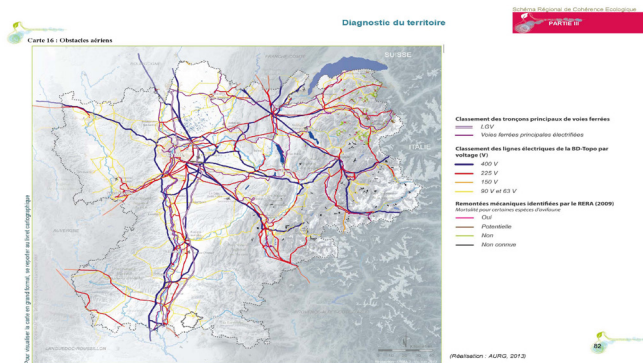


Fig. 11. — Carte des lignes électriques extraites du diagnostic du Schéma régional de Cohérence écologique (SRCE) de Rhône-Alpes en 2014.

Ces éléments régionaux sont clairement positifs et montrent que ces enjeux sont d'ores et déjà perçus par certains acteurs. Une réflexion plus approfondie sur la réduction des obstacles aériens serait donc à engager au niveau national afin d'encourager et d'accompagner ces dynamiques locales.

Néanmoins, rappelons que nous nous situons à une période charnière où les SRCE, de même que les Schémas régionaux Climat Air Énergie (SRCAE) sont désormais obsolètes, avec l'instauration des Sradet. Cette situation va modifier des aspects importants de par la modalité de ces nouveaux schémas (opposabilité, contenu, poids de la cartographie, etc.). Or, dans le même temps, la transition énergétique s'accélère avec l'établissement d'objectifs régionaux et locaux de développement d'énergie renouvelable et une multiplication du nombre de projets éoliens. Il convient donc de rester très vigilant sur la manière dont les enjeux faunistiques seront considérés dans ces nouveaux schémas, notamment par rapport à la problématique de l'éolien. Un bilan des Sradet sur la prise en compte de la faune aérienne sera nécessaire dès que leur adoption sera effective dans toutes les régions.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Alors que de nombreux animaux fréquentent l'espace aérien, les activités humaines occupent également sensiblement cette strate, générant des obstacles particuliers aux déplacements de la faune. Différentes mesures de gestions sont d'ores et déjà mises en œuvre ou testées pour diminuer l'impact de ces structures. Néanmoins, ces mesures sont sectorielles et restent plus ou moins opérationnelles et efficaces à ce jour, et souvent peu documentées par des études scientifiques robustes. De plus, si la réglementation relative aux espèces protégées est bien adaptée à l'échelle des projets, une approche globale permettrait de mettre en cohérence ces mesures. La Trame verte et bleue semble la politique publique toute indiquée pour cela.

À l'issue de cette synthèse, nous formulons cinq recommandations principales :

- rassembler la connaissance disponible à travers des revues bibliographiques ou des méta-analyses pour mieux comprendre les modalités des flux aériens pour les espèces à vols

actifs et, si possible, pour les organismes dispersés par le vent. Ces synthèses pourraient traiter différents paramètres de vols (hauteurs moyennes, distances maximales parcourues, etc.) et éventuellement leurs corrélations avec les caractères morphologiques des animaux déterminant la manœuvrabilité (longueurs des ailes, charges alaires, etc.). Tous ces éléments pourraient aider à émettre des recommandations de gestion d'obstacles ou à les planifier. Un travail a déjà été effectué en ce sens pour les Chauves-souris (Voigt *et al.* 2018) mais nécessite peut-être d'être complété ; par ailleurs, il ne semble pas exister d'équivalent sur les Oiseaux, qui est pourtant le groupe le plus affecté par ces infrastructures. Cela nous semble un besoin prioritaire ;

- au regard du manque de connaissance mis en évidence pour certains groupes biologiques et/ou types d'obstacles, encourager et engager de nouvelles études de terrain afin de mieux comprendre les impacts, d'une part, et évaluer l'efficacité des mesures de réduction d'impact mises en œuvre, d'autre part. Pour cela, des protocoles expérimentaux robustes et standardisés, en particulier de type BACI, permettant de conclure réellement de manière opérationnelle devraient être privilégiés (Sordello *et al.* 2019a). Concernant les obstacles pour lesquels il existe visiblement très peu de solutions concrètes (par exemple pour le bâti vitré qui a pour seule solution ou presque actuellement la pose d'autocollants dont l'efficacité paraît limitée) il s'agirait aussi d'innover en testant de nouvelles idées en lien avec les filières professionnels concernées (par exemple pour les vitres : les architectes et les concepteurs de bâtiments) ;

- approfondir l'identification d'une « Trame aérienne » à différentes échelles. Un travail d'analyse et de cartographie serait à mener, notamment à l'échelle nationale. Celui-ci concernerait à la fois les éléments de « rugosité » (pression) entravant les déplacements des espèces volantes et les couloirs aériens de la faune (au moins Chiroptères et Oiseaux dans un premier temps). Cela permettrait à terme d'aller vers une carte nationale des enjeux de biodiversité aérienne qui caractériserait les zones à préserver et à restaurer. Cette carte ne serait pas basée sur une approche binaire « concerné/non concerné » et ferait apparaître différents niveaux de risques/enjeux sur l'ensemble du territoire. Ce travail s'inscrirait ainsi dans la continuité de la carte des voies de migration de l'avifaune d'ores et déjà intégrée aux ONTVB. Cette démarche pourrait aussi aboutir à la construction d'un indicateur national (à inscrire dans l'Observatoire national de la Biodiversité – ONB), par exemple un indicateur de pression (niveau et évolution de la rugosité aérienne en France) en compilant les données existantes. Ce travail d'analyse et de cartographie serait ensuite à approfondir et affiner aux échelles régionales et locales, là où se précisent les enjeux et les actions qui ont un impact direct sur la qualité de la Trame aérienne, ce qui permettrait donc de mieux orienter la planification des futures infrastructures ;

- renforcer la prise en compte des enjeux biodiversité dans la planification régionale et locale des infrastructures potentiellement impactantes pour la faune volantes. Il apparaît nécessaire de renforcer cette intégration à différentes échelles spatiales

(communes, départements, bassins versants, régions, etc.), qui pourra s'appuyer sur les enjeux nationaux précédemment identifiés en complément des études locales à mener. À ce titre, un bilan de la prise en compte des enjeux biodiversité dans les schémas et plans existants (Sraddet, SRE, documents d'urbanismes, évaluations environnementales, études d'incidences, études d'impacts, etc.) est indispensable pour évaluer l'efficacité actuelle des dispositifs et le cas échéant en tirer des enseignements. L'objectif est aussi bien d'éviter de nouveaux impacts que de réduire les impacts des infrastructures existantes qu'il faudrait assortir systématiquement d'un suivi dans le temps. Les effets cumulés (aussi bien des infrastructures aériennes que des autres pressions anthropiques) devraient aussi être considérés. Il existe également un enjeu à articuler les différentes nouvelles trames et en particulier la Trame aérienne et la Trame noire du fait d'une synergie entre éclairage nocturne et collisions de la faune volante. Ces trames « émergentes » devraient en outre avoir une reconnaissance réglementaire claire impliquant leur prise en compte obligatoire dans les schémas et les projets ;

– compiler les bonnes pratiques pour la gestion des obstacles aériens. Cela pourrait prendre la forme d'un guide technique de préconisations, par type d'obstacles et par groupe d'espèces. Il permettrait de partager les retours d'expériences disponibles et ainsi de démultiplier la mise en œuvre des mesures déjà opérationnelles. Toutes les pratiques doivent être visées ici, y compris pendant la phase de chantier ou de démantèlement par exemple.

Enfin, notons aussi la nécessité d'établir un état des lieux similaire à celui proposé par cet article pour le milieu marin, très concerné notamment par l'éolien.

Remerciements

Nous remercions les deux relecteurs Maxime Zucca et Pascal Orabi.

RÉFÉRENCES

- ABLE K. P. & ABLE M. A. 1990. — Ontogeny of migratory orientation in the savannah sparrow, *Passerculus sandwichensis*: calibration of the magnetic compass. *Animal Behaviour* 39: 905-913. [https://doi.org/10.1016/S0003-3472\(05\)80791-2](https://doi.org/10.1016/S0003-3472(05)80791-2)
- ALERSTAM T., CHAPMAN J. W., BÄCKMAN J., SMITH A. D., KARLSSON H., NILSSON C., REYNOLDS D. R., KLAASSEN R. H. G. & HILL J. K. 2011. — Convergent patterns of long-distance nocturnal migration in noctuid moths and passerine birds. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 278 (1721): 3074-3080. <https://doi.org/10.1098/rspb.2011.0058>
- AMSALLEM J., SORDELLO R., BILLON L. & VANPEENE S. 2018. — Bilan des schémas régionaux de cohérence écologique en France : quels apports méthodologiques pour l'identification et la cartographie de la Trame verte et bleue? *Sciences Eaux & Territoires* 25 (1): 4. <https://doi.org/10.3917/set.025.0004>
- ARTHUR L. & LEMAIRE M. 2015. — *Les Chauves-souris de France, Belgique, Luxembourg et Suisse*. Biotope Éditions, Muséum national d'Histoire naturelle, Paris, 544 p.
- ASPAS (2010). — *Le verre : un piège pour les Oiseaux*. ASPAS, Crest, 6 p.
- AVIAN POWER LINE INTERACTION COMMITTEE 2012. — *Reducing Avian Collisions with Power Lines: the State of the Art in 2012*. Edison Electric Institute and APLIC, Washington, 184 p.
- BAERWALD E. F., D'AMOURS G. H., KLUG B. J. & BARCLAY R. M. R. 2008. — Barotrauma is a significant cause of bat fatalities at wind turbines. *Current Biology* 18 (16): 695-696. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2008.06.029>
- BARRÉ K. 2017. — *Mesurer et compenser l'impact de l'éolien sur la biodiversité en milieu agricole*. Muséum national d'Histoire naturelle, Paris, 348 p.
- BARRÉ K., LE VIOL I., BAS Y., JULLIARD R. & KERBIRIOU C. 2018. — Estimating habitat loss due to wind turbine avoidance by bats: Implications for European siting guidance. *Biological Conservation* 226: 205-214. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2018.07.011>
- BARRIENTOS R., PONCE C., PALACÍN C., MARTÍN C. A., MARTÍN B. & ALONSO J. C. 2012. — Wire marking results in a small but significant reduction in avian mortality at power lines: a BACI designed study. *PLoS ONE* 7 (3): e32569. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0032569>
- BARTON C. M., RIDING C. S. & LOSS S. R. 2017. — Magnitude and correlates of bird collisions at glass bus shelters in an urban landscape. *PLOS ONE* 12 (6): e0178667. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0178667>
- BENNETT A. F. 2003. — *Linkages in the Landscape: the Role of Corridors and Connectivity in Wildlife Conservation*. IUCN, Gland, Cambridge, 254 p.
- BENNETT G., MULONGOY K. J. & SECRETARIAT OF THE CONVENTION ON BIOLOGICAL DIVERSITY 2014. — Review of experience with ecological networks, corridors and buffer zones. *Animal Conservation* 17 (4): 354-358. <https://doi.org/10.1111/acv.12102>
- BERNARDINO J., BISPO R., COSTA H. & MASCARENHAS M. 2013. — Estimating bird and bat fatality at wind farms: a practical overview of estimators, their assumptions and limitations. *New Zealand Journal of Zoology* 40 (1): 63-74. <https://doi.org/10.1080/03014223.2012.758155>
- BESNARD A. & BERNARD C. 2017. — *Deux applications web en libre accès pour calibrer et évaluer la pertinence des suivis de mortalités sous les éoliennes*. Éolien et Biodiversité, Artigues-près-Bordeaux, 3 p.
- BEUCHER Y., RICHOU C. & ALBESPY F. 2017. — *Maîtrise de la mortalité des Chiroptères – Analyse comparée de la mise en place de mesures de régulation de trois parcs éoliens*. Éolien et Biodiversité, Artigues-près-Bordeaux, 7 p.
- BIBER J.-P. 1998. — *Parois paraphones transparentes et collisions d'Oiseaux*. Bureau NATCONS, Bâle, 6 p.
- BILLON L., DUCHÈNE C., GOMES S., GRÉGOIRE A., KREMP M., MUSTIÈRE S. & SORDELLO R. 2020. — Mapping the French green infrastructure – an exercise in homogenizing heterogeneous regional data. *International Journal of Cartography* 6 (2): 241-262. <https://doi.org/10.1080/23729333.2020.1717843>
- BLACKWELL B. F. & WRIGHT S. E. 2006. — Collisions of Red-tailed Hawks (*Buteo jamaicensis*), Turkey Vultures (*Cathartes aura*), and Black Vultures (*Coragyps atratus*) with aircraft: implications for bird strike reduction. *Journal of Raptor Research* 40 (1): 76-80. [https://doi.org/10.3356/0892-1016\(2006\)40\[76:CORHBJ\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.3356/0892-1016(2006)40[76:CORHBJ]2.0.CO;2)
- BORNER L. 2016. — *Apports méthodologiques à l'étude des interactions des Oiseaux avec le réseau de transport d'électricité en France*. Muséum national d'Histoire naturelle, Paris, 190 p.
- BORNER L., DURIEZ O., BESNARD A., ROBERT A., CARRERE V. & JIGUET F. 2017. — Bird collision with power lines: estimating carcass persistence and detection associated with ground search surveys. *Ecosphere* 8 (11): e01966. <https://doi.org/10.1002/ecs2.1966>
- BRACEY A. M., ETTERTSON M. A., NIEMI G. J. & GREEN R. F. 2016. — Variation in bird-window collision mortality and scavenging rates within an urban landscape. *The Wilson Journal of Ornithology* 128 (2): 355. <https://doi.org/10.1676/wils-128-02-355-367.1>
- BROWN B. B., KUSAKABE E., ANTONOPOULOS A., SIDDOWAY S. & THOMPSON L. 2019. — Winter bird-window collisions: mitiga-

- tion success, risk factors, and implementation challenges. *PeerJ* 7: e7620. <https://doi.org/10.7717/peerj.7620>
- CORTEN G. P. & VELDKAMP H. F. 2001. — Insects can halve wind-turbine power. *Nature* 412 (6842): 41-42. <https://doi.org/10.1038/35083698>
- DAVIES D. Z. G. & PULLIN A. S. 2006. — *Do hedgerow corridors increase the population viability of woodland species? Systematic Review*. Collaboration for Environmental Evidence, Birmingham, 40 p.
- DEAL RÉUNION 2014. — *Étude préalable d'identification et de cartographie des réseaux écologiques à la Réunion*. DEAL Réunion, Saint-Denis, 26 p.
- DESCHATRES A., GADOT A.-S., HERVE C., ROY E. L., LORENZINI N., MIONNET A., PETITJEAN N., REDOUTE M. & SOUFFLOT J. 2010. — *Synthèse de l'impact de l'éolien sur l'avifaune migratrice sur cinq parcs éolien en Champagne-Ardenne*. LPO, Outine, 117 p.
- DIRECTION DÉPARTEMENTALE DES TERRITOIRES ET DE LA MER 2016. — *Gestion de la colonie d'Outarde canepetière (Tetrax tetrax) de l'aéroport de Marseille-provence*. Note de présentation de la Direction départementale des Territoires et de la Mer, Marseille, 3 p.
- DOKTER A. M., LIECHTI F., STARK H., DELOBBE L., TABARY P. & HOLLEMAN I. 2011. — Bird migration flight altitudes studied by a network of operational weather radars. *Journal of The Royal Society Interface* 8 (54): 30-43. <https://doi.org/10.1098/rsif.2010.0116>
- DOLBEER R. A. 2006. — Height distribution of birds recorded by collisions with civil aircraft. *Journal of Wildlife Management* 70 (5): 1345-1350. [https://doi.org/10.2193/0022-541X\(2006\)70\[1345:HDOBRB\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.2193/0022-541X(2006)70[1345:HDOBRB]2.0.CO;2)
- DREWITT A. L. & LANGSTON R. H. W. 2008. — Collision effects of wind-power generators and other obstacles on birds. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1134 (1): 233-266. <https://doi.org/10.1196/annals.1439.015>
- DURIEZ O., PILARD P., SAULNIER N., BOUZIN M. & BESNARD A. 2017. — *Impact des mortalités additionnelles induites par les collisions avec les éoliennes pour la viabilité des populations de Faucons crécerellette*. Éolien et Biodiversité, Artigues-près-Bordeaux, 18 p.
- ELMIGER C. & TROCMÉ M. 2007. — Developing fauna-friendly transport structures: analysis of the impact of specific road engineering structures on wildlife mortality and mobility, in LEROY IRWIN C., NELSON D. & MCDERMOTT K. P. (éds) *Proceedings of the 2007 International Conference on Ecology and Transportation*. Center for Transportation and the Environment, North Carolina State University, Raleigh: 212-219.
- ERICKSON W. P., JOHNSON G. D. & JR D. P. Y. 2005. — A Summary and Comparison of Bird Mortality from Anthropogenic Causes with an Emphasis on Collisions, in C. JOHN RALPH & TERRELL D. RICH (éds), *Bird Conservation Implementation and Integration in the Americas: Proceedings of the Third International Partners in Flight Conference*. 2002 March 20-24. Asilomar: 1029-1042.
- EUROPEAN COMMISSION 2012. — *The Multifunctionality of Green Infrastructure*. Science for Environment Policy, European Commission, Bruxelles, 37 p.
- EUROPEAN COMMISSION 2019a. — *Guidance on a Strategic Framework for Further Supporting the Deployment of EU-level Green and Blue Infrastructure*. Commission staff working document, Brussels, 102 p.
- EUROPEAN COMMISSION 2019b. — *Review of Progress on Implementation of the EU Green Infrastructure Strategy*. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 70 p.
- FENSOME A. G. & MATHEWS F. 2016. — Roads and bats: a meta-analysis and review of the evidence on vehicle collisions and barrier effects. *Mammal Review* 46 (4): 311-323. <https://doi.org/10.1111/mam.12072>
- GAULTIER S. P., MARX G. & ROUX D. 2019. — *Éoliennes & Biodiversité – Synthèse des connaissances sur les impacts et les moyens de les atténuer*. Office national de la chasse et de la faune sauvage, LPO, Sault, 120 p.
- GILBERT-NORTON L., WILSON R., STEVENS J. R. & BEARD K. H. 2010. — A meta-analytic review of corridor effectiveness: corridor meta-analysis. *Conservation Biology* 24 (3): 660-668. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2010.01450.x>
- GRODSKY S. M., BEHR M. J., GENDLER A., DRAKE D., DIETTERLE B. D., RUDD R. J. & WALRATH N. L. 2011. — Investigating the causes of death for wind turbine-associated bat fatalities. *Journal of Mammalogy* 92 (5): 917-925. <https://doi.org/10.1644/10-MAMM-A-404.1>
- GUINARD É., JULLIARD R. & BARBRAUD C. 2012. — Motorways and bird traffic casualties: carcasses surveys and scavenging bias. *Biological Conservation* 147 (1): 40-51. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2012.01.019>
- HAGER S. B., COSENTINO B. J., AGUILAR-GÓMEZ M. A., ANDERSON M. L., BAKERMANS M., BOVES T. J., BRANDES D., BUTLER M. W., BUTLER E. M., CAGLE N. L., CALDERÓN-PARRA R., CAPPARELLA A. P., CHEN A., CIPOLLINI K., CONKEY A. A. T., CONTRERAS T. A., COOPER R. I., CORBIN C. E., CURRY R. L., DOSCH J. J., DREW M. G., DYSON K., FOSTER C., FRANCIS C. D., FRASER E., FURBUSH R., HAGEMEYER N. D. G., HOPFENSBERGER K. N., KLEM D., LAGO E., LAHEY A., LAMP K., LEWIS G., LOSS S. R., MACHTANS C. S., MADOSKY J., MANESS T. J., MCKAY K. J., MENKE S. B., MUMA K. E., OCAMPO-PENUELA N., O'CONNELL T. J., ORTEGA-ÁLVAREZ R., PITT A. L., PUGA-CABALLERO A. L., QUINN J. E., VARIAN-RAMOS C. W., RIDING C. S., ROTH A. M., SAENGER P. G., SCHMITZ R. T., SCHNURR J., SIMMONS M., SMITH A. D., SOKOLOSKI D. R., VIGLIOTTI J., WALTERS E. L., WALTERS L. A., WEIR J. T., WINNETT-MURRAY K., WITHEY J. C. & ZURIA I. 2017. — Continent-wide analysis of how urbanization affects bird-window collision mortality in North America. *Biological Conservation* 212: 209-215. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2017.06.014>
- HAGER S. B. & CRAIG M. E. 2014. — Bird-window collisions in the summer breeding season. *PeerJ* 2: e460. <https://doi.org/10.7717/peerj.460>
- HANAGASIOGLU M., ASCHWANDEN D. J., BONTADINA D. F. & DE LA PUENTE NILSSON M. 2015. — *Investigation of the Effectiveness of Bat and Bird Detection of the DTBat and DTBird Systems at Calandawind Turbine*. Swiss Federal Office of Energy (SFOE), Ittigen, 142 p.
- HAYES M. A. 2013. — Bats killed in large numbers at United States wind energy facilities. *BioScience* 63 (12): 975-979. <https://doi.org/10.1525/bio.2013.63.12.10>
- HILKE G. 2000. — *Les Oiseaux et les vitres*. ASPO, Zurich; Station ornithologique suisse, Sempach; Nos Oiseaux, La Chaux-de-Fonds, 4 p.
- HOLLAND R. A., KIRSCHVINK J. L., DOAK T. G. & WIKELSKI M. 2008. — Bats use magnetite to detect the earth's magnetic field. *PLoS ONE* 3 (2): e1676. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0001676>
- HÜPPÖP O., HÜPPÖP K., DIERSCHKE J. & HILL R. 2016. — Bird collisions at an offshore platform in the North Sea. *Bird Study* 63 (1): 73-82. <https://doi.org/10.1080/00063657.2015.1134440>
- HÜSE B., SZABÓ S., DEÁK B. & TÓTHMÉRÉSZ B. 2016. — Mapping an ecological network of green habitat patches and their role in maintaining urban biodiversity in and around Debrecen city (Eastern Hungary). *Land Use Policy* 57: 574-581. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.06.026>
- HUTTERER R., IVANOVA T., MEYER-CORDS C. & RODRIQUES L. 2005. — *Bat Migration in Europe. A Review of Banding Data and Literature*. Federal Agency for Nature Conservation, Bonn, 162 p.
- IPBES 2019. — *Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*. IPBES secretariat, Bonn, 1148 p. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3831673>
- ITTY C. & DURIEZ O. 2017. — *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*, in MARX G. & CHESNOT I. (éds), Actes du Séminaire éolien et biodiversité, Artigues-près-Bordeaux, 21-22 novembre 2017. LPO, Rochefort, 8 p.

- JANSS G. F. E. 2000. — Avian mortality from power lines: a morphologic approach of a species-specific mortality. *Biological Conservation* 95 (3): 353-359. [https://doi.org/10.1016/S0006-3207\(00\)00021-5](https://doi.org/10.1016/S0006-3207(00)00021-5)
- JENKINS A. R., SMALLIE J. J. & DIAMOND M. 2010. — Avian collisions with power lines: a global review of causes and mitigation with a South African perspective. *Bird Conservation International* 20 (3): 263-278. <https://doi.org/10.1017/S0959270910000122>
- JIGUET F., BURGESS M., THORUP K., CONWAY G., ARROYO MATOS J. L., BARBER L., BLACK J., BURTON N., CASTELLÓ J., CLEWLEY G., COPETE J. L., CZAJKOWSKI M. A., DALE S., DAVIS T., DOMBROVSKI V., DREW M., ELTS J., GILSON V., GRZEGORCZYK E., HENDERSON I., HOLDSWORTH M., HUSBANDS R., LORILLIERE R., MARJA R., MINKEVICIUS S., MOUSSY C., OLSSON P., ONRUBIA A., PÉREZ M., PIACENTINI J., PIHA M., PONS J.-M., PROCHÁZKA P., RAKOVIĆ M., ROBINS H., SEIMOLA T., SELSTAM G., SKIERCZYŃSKI M., SONDELL J., THIBAUT J.-C., TØTTRUP A. P., WALKER J. & HEWSON C. 2019. — Desert crossing strategies of migrant songbirds vary between and within species. *Scientific Reports* 9 (1): 20248. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-56677-4>
- JONGMAN R. H. G. 1995. — Nature conservation planning in Europe: developing ecological networks. *Landscape and Urban Planning* 32 (3): 169-183. [https://doi.org/10.1016/0169-2046\(95\)00197-0](https://doi.org/10.1016/0169-2046(95)00197-0)
- JONGMAN R. H. G., KÜLVIK M. & KRISTIANSEN I. 2004. — European ecological networks and greenways. *Landscape and Urban Planning* 68 (2-3): 305-319. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(03\)00163-4](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(03)00163-4)
- KAWAI K., YAMAMOTO T., ISHIHARA K. & MIZUNO A. 2015. — First record of the parti-coloured bat *Vespertilio murinus* (Chiroptera: Vespertilionidae) from the Ishikawa Prefecture provides insights into the migration of bats to Japan. *Mammal Study* 40 (2): 121-126. <https://doi.org/10.3106/041.040.0208>
- KELLER I., NENTWIG W. & LARGIADÈR C. R. 2004. — Recent habitat fragmentation due to roads can lead to significant genetic differentiation in an abundant flightless ground beetle. *Molecular Ecology* 13 (10): 2983-2994. <https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.2004.02310.x>
- KELLY T. C., SLEEMAN D. P., COUGHLAN N. E., DILLANE E. & O'CALLAGHAN M. J. A. 2017. — Bat collisions with civil aircraft in the Republic of Ireland over a decade suggest negligible impact on aviation safety. *European Journal of Wildlife Research* 63 (1): 23. <https://doi.org/10.1007/s10344-017-1081-x>
- KERTH G. & MELBER M. 2009. — Species-specific barrier effects of a motorway on the habitat use of two threatened forest-living bat species. *Biological Conservation* 142 (2): 270-279. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2008.10.022>
- KLEM D. 1990. — Collisions between birds and windows: mortality and prevention. *Journal of Field Ornithology* 61 (1): 120-128.
- LEHNERT L. S., KRAMER-SCHADT S., SCHÖNBORN S., LINDECKE O., NIERMANN I. & VOIGT C. C. 2014. — Wind farm facilities in Germany kill noctule bats from near and far. *PLoS ONE* 9 (8): e103106. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0103106>
- LIECHTI F., GUÉLAT J. & KOMENDA-ZEHNDER S. 2013. — Modelling the spatial concentrations of bird migration to assess conflicts with wind turbines. *Biological Conservation* 162: 24-32. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2013.03.018>
- LIECHTI F., BAUER S., DHANJAL-ADAMS K. L., EMMENEGGER T., ZEHTINDJIEV P. & HAHN S. 2018. — Miniaturized multi-sensor loggers provide new insight into year-round flight behaviour of small trans-Saharan avian migrants. *Movement Ecology* 6 (1): 19. <https://doi.org/10.1186/s40462-018-0137-1>
- LONG C. V., FLINT J. A. & LEPPER P. A. 2011. — Insect attraction to wind turbines: does colour play a role? *European Journal of Wildlife Research* 57 (2): 323-331. <https://doi.org/10.1007/s10344-010-0432-7>
- LOSS S. R., WILL T. & MARRA P. P. 2013. — Estimates of bird collision mortality at wind facilities in the contiguous United States. *Biological Conservation* 168: 201-209. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2013.10.007>
- LOSS S. R., WILL T. & MARRA P. P. 2014a. — Refining estimates of bird collision and electrocution mortality at power lines in the United States. *PLoS ONE* 9 (7): e101565. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0101565>
- LOSS S. R., WILL T., LOSS S. S. & MARRA P. P. 2014b. — Bird-building collisions in the United States: estimates of annual mortality and species vulnerability. *The Condor* 116 (1): 8-23. <https://doi.org/10.1650/CONDOR-13-090.1>
- LOSS S. R., WILL T. & MARRA P. P. 2015. — Direct mortality of birds from anthropogenic causes. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 46 (1): 99-120. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-112414-054133>
- MACHTANS C. S., WEDELES C. H. R. & BAYNE E. M. 2013. — A first estimate for Canada of the number of birds killed by colliding with building windows. *Avian Conservation and Ecology* 8 (2): 6. <https://doi.org/10.5751/ACE-00568-080206>
- MAILLARD D. 2009. — *Localisation des câbles dangereux pour les Oiseaux sur les domaines skiables*. ONCFS, Paris, 1 p.
- MARQUES A. T., BATALLA H., RODRIGUES S., COSTA H., PEREIRA M. J. R., FONSECA C., MASCARENHAS M. & BERNARDINO J. 2014. — Understanding bird collisions at wind farms: an updated review on the causes and possible mitigation strategies. *Biological Conservation* 179: 40-52. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2014.08.017>
- MARX G. 2017. — *Le parc éolien français et ses impacts sur l'avifaune – Étude des suivis de mortalité réalisés en France de 1997 à 2015*. LPO France, Rochefort, 92 p.
- MATOS C., SILLERO N. & ARGANA E. 2012. — Spatial analysis of amphibian road mortality levels in northern Portugal country roads. *Amphibia-Reptilia* 33 (3-4): 469-483. <https://doi.org/10.1163/15685381-00002850>
- MAY R., REITAN O., BEVANGER K., LORENTSEN S.-H. & NYGÅRD T. 2015. — Mitigating wind-turbine induced avian mortality: Sensory, aerodynamic and cognitive constraints and options. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 42: 170-181. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.002>
- MAY R., NYGÅRD T., FALKDALEN U., ÅSTRÖM J., HAMRE Ø. & STOKKE B. G. 2020. — Paint it black: efficacy of increased wind turbine rotor blade visibility to reduce avian fatalities. *Ecology and Evolution* 10 (16): 8927-8935. <https://doi.org/10.1002/ece3.6592>
- MCGUIRE L. P. & FENTON M. B. 2010. — Hitting the wall: light affects the obstacle avoidance ability of free-flying little brown bats (*Myotis lucifugus*). *Acta Chiropterologica* 12 (1): 247-250. <https://doi.org/10.3161/150811010X504734>
- MTES 2014. — *Trame verte et bleue – Orientations nationales pour la préservation et la remise en bon état des continuités écologiques*. MTES, Paris, 71 p.
- PARKINS K. L., ELBIN S. B. & BARNES E. 2015. — Light, glass, and bird – building collisions in an urban park. *Northeastern Naturalist* 22 (1): 84-94. <https://doi.org/10.1656/045.022.0113>
- PRYKE J. S., SAMWAYS M. J. & DE SAEDELEER K. 2015. — An ecological network is as good as a major protected area for conserving dragonflies. *Biological Conservation* 191: 537-545. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2015.07.036>
- REBOLO-IFRÁN N., DI VIRGILIO A. & LAMBERTUCCI S. A. 2019. — Drivers of bird-window collisions in southern South America: a two-scale assessment applying citizen science. *Scientific Reports* 9 (1): 18148. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54351-3>
- REES E. C. 2012. — Impacts of wind farms on swans and geese: a review. *Wildfowl* 62: 37-72
- REHBEIN J. A., WATSON J. E. M., LANE J. L., SONTER L. J., VENTER O., ATKINSON S. C. & ALLAN J. R. 2020. — Renewable energy development threatens many globally important biodiversity areas. *Global Change Biology* 26 (5): 3040-3051. <https://doi.org/10.1111/gcb.15067>

- RIDING C. S. & LOSS S. R. 2018. — Factors influencing experimental estimation of scavenger removal and observer detection in bird-window collision surveys. *Ecological Applications* 28 (8): 2119-2129. <https://doi.org/10.1002/eap.1800>
- RIOUX S., SAVARD J.-P. L. & GERICK A. A. 2013. — Avian mortalities due to transmission line collisions: a review of current estimates and field methods with an emphasis on applications to the Canadian electric network. *Avian Conservation and Ecology* 8 (2): 7. <https://doi.org/10.5751/ACE-00614-080207>
- ROBINSON WILLMOTT J., FORCEY G. M. & HOOTON L. A. 2015. — Developing an automated risk management tool to minimize bird and bat mortality at wind facilities. *Ambio* 44 (S4): 557-571. <https://doi.org/10.1007/s13280-015-0707-z>
- RODRIGUES L., BACH L., DUBOURG-SAVAGE M.-J., KOVAC D., KERVYN T., DEKKER J., KEPEL A., BACH P., COLLINS J., HARBUSCH C., PARK K., MICEVSKI B. & MINDERMAN J. 2015. — *Lignes directrices pour la prise en compte des Chauves-souris dans les projets éoliens. Actualisation 2015*. PNUE, Eurobats (coll. Eurobats Publication Series; 6), Bonn, 133 p.
- RÖSSLER M., NEMETH E. & BRUCKNER A. 2015. — Glass pane markings to prevent bird-window collisions: less can be more. *Biologia* 70: 535-541. <https://doi.org/10.1515/biolog-2015-0057>
- SABO A. M., HAGEMeyer N. D. G., LAHEY A. S. & WALTERS E. L. 2016. — Local avian density influences risk of mortality from window strikes. *PeerJ* 4: e2170. <https://doi.org/10.7717/peerj.2170>
- SCACCO M., FLACK A., DURIEZ O., WIKELSKI M. & SAFI K. 2019. — Static landscape features predict uplift locations for soaring birds across Europe. *Royal Society Open Science* 6 (1): 181440. <https://doi.org/10.1098/rsos.181440>
- SCHMID H., WALDBURGER P. & HEYEN D. 2008. — *Les Oiseaux, le verre et la lumière dans la construction*. Station ornithologique suisse, Sempach, 49 p.
- SERRANO F., PITA R., MOTA-FERREIRA M., BEJA P. & SEGURADO P. 2020. — Landscape connectivity affects individual survival in unstable patch networks: the case of a freshwater turtle inhabiting temporary ponds. *Freshwater Biology* 65 (3): 540-551. <https://doi.org/10/ggpsw8>
- SHOBRAK M. 2012. — Electrocution and collision of birds with power lines in Saudi Arabia. *Zoology in the Middle East* 57 (1): 45-52. <https://doi.org/10.1080/09397140.2012.10648962>
- SILVA J. P., SANTOS M., QUEIRÓS L., LEITÃO D., MOREIRA F., PINTO M., LEQOC M. & CABRAL J. A. 2010. — Estimating the influence of overhead transmission power lines and landscape context on the density of little bustard *Tetrax tetrax* breeding populations. *Ecological Modelling* 221 (16): 1954-1963. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.03.027>
- SKÓRKA P. 2016. — The detectability and persistence of road-killed butterflies: an experimental study. *Biological Conservation* 200: 36-43. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.05.026>
- SKÓRKA P., LENDA M. & MOROŃ D. 2018. — Roads affect the spatial structure of butterfly communities in grassland patches. *PeerJ* 6: e5413. <https://doi.org/10.7717/peerj.5413>
- SMALLWOOD K. S. & BELL D. A. 2020. — Effects of wind turbine curtailment on bird and bat fatalities. *The Journal of Wildlife Management* 84 (4): 685-696. <https://doi.org/10.1002/jwmg.21844>
- SODHI N. S. 2002. — Competition in the air: birds versus aircraft. *The Auk* 119 (3): 587-595. <https://doi.org/10.1093/auk/119.3.587>
- SORDELLO R. 2017. — *Trame verte, trame bleue et toutes ces autres trames dont il faudrait aussi se préoccuper*. Regard R72 SFE, Paris, 15 p.
- SORDELLO R., COMOLET-TIRMAN J., DA COSTA H., MASSARY J.-C. (DE), DUPONT P., ESCUDER O., GRECH G., HAFFNER P., ROGEON G., SIBLET J.-P. & TOUROULT J. 2011. — *Trame verte et bleue – Critères nationaux de cohérence – Contribution à la définition du critère pour une cohérence interrégionale et transfrontalière*. SPN-MNH, Paris, 94 p.
- SORDELLO R., BILLON L., AMSALLEM J. & VANPEENE S. 2017. — *Bilan technique et scientifique sur l'élaboration des Schémas régionaux de cohérence écologique. Méthodes d'identification des composantes de la TVB*. Centre de ressources TVB, Paris, 104 p.
- SORDELLO R., BERTHEAU Y., COULON A., JEUSSET A., OUEDRAOGO D. Y., VANPEENE S., VARGAC M., VILLEMAY A., WITTE I., REYJOL Y. & TOUROULT J. 2019a. — *Les protocoles expérimentaux en écologie. Principaux points clefs*. UMS PatriNat (OFB-CNRS-MNH), Paris, 33 p.
- SORDELLO R., AMSALLEM J., BAS Y., BILLON L., BORNER L., COMOLET-TIRMAN J., DALOZ A., DUGUÉ A. L., GUINARD E., JULIEN J. F., LACOEUILHE A., LOMBARD A., MARMET J., MARX G., MÉNARD C., PAQUIER F., REYJOL Y., SCHWEIGERT N., SIBLET J.-P., THIERRY C., VANPEENE S. & VIGNON V. 2019b. — *Trame verte et bleue et espèces volantes. Note d'enjeux et de problématique*. UMS PatriNat, Cerema, Cescos, Irstea LPO, MTES, Paris, 26 p.
- STAC 2020. — *Collisions animales – Année 2018. Bulletin statistique*. Service technique de l'Aviation civile, Bonneuil-sur-Marne, 19 p.
- THIELE J., KELLNER S., BUCHHOLZ S. & SCHIRMEL J. 2018. — Connectivity or area: what drives plant species richness in habitat corridors? *Landscape Ecology* 33 (2): 173-181. <https://doi.org/10.1007/s10980-017-0606-8>
- TIAN L., ZHANG B., ZHANG J., ZHANG T., CAI Y., QIN H., METZNER W. & PAN Y. 2019. — A magnetic compass guides the direction of foraging in a bat. *Journal of Comparative Physiology A* 205 (4): 619-627. <https://doi.org/10.1007/s00359-019-01353-1>
- TINTO A., REAL J. & MAÑOSA S. 2010. — Predicting and correcting electrocution of birds in Mediterranean areas. *Journal of Wildlife Management* 74 (8): 1852-1862. <https://doi.org/10.2193/2009-521>
- TORRES A., JAEGER J. A. G. & ALONSO J. C. 2016. — Assessing large-scale wildlife responses to human infrastructure development. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 113 (30): 8472-8477. <https://doi.org/10.1073/pnas.1522488113>
- TRIEB F. 2018. — *Interference of Flying Insects and Wind Parks*. Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt, Stuttgart, 30 p.
- VAN DOREN B. M., HORTON K. G., DOKTER A. M., KLINCK H., ELBIN S. B. & FARNSWORTH A. 2017. — High-intensity urban light installation dramatically alters nocturnal bird migration. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114 (42): 11175-11180. <https://doi.org/10.1073/pnas.1708574114>
- VANPEENE S., SORDELLO R., AMSALLEM J. & BILLON L. 2017. — *Bilan technique et scientifique des Schémas régionaux de cohérence écologique. Méthodologies d'identification des obstacles et d'attribution des objectifs*. Centre de ressources TVB, Paris, 89 p.
- VARRET C. 2016. — *Le guide biodiversité et réseaux électriques*. EDF, Electricité de Strasbourg, Erdf, RTE, Strasbourg, 51 p.
- VILLERS A. 2019. — Intérêt du suivi individuel pour la gestion du risque animalier: le cas de l'Outarde canepetière sur la plateforme aéroportuaire de Marseille-Provence. *Faune sauvage* 323 (2^e trimestre): 10-16
- VOIGT C. C. 2021. — Insect fatalities at wind turbines as biodiversity sinks. *Conservation Science and Practice* 3 (5): e366. <https://doi.org/10.1111/csp2.366>
- VOIGT C. C., LEHNERT L. S., PETERSONS G., ADORF F. & BACH L. 2015. — Wildlife and renewable energy: German politics cross migratory bats. *European Journal of Wildlife Research* 61 (2): 213-219. <https://doi.org/10.1007/s10344-015-0903-y>
- VOIGT C. C., CURRIE S. E., FRITZE M., ROELEKE M. & LINDECKE O. 2018. — Conservation strategies for bats flying at high altitudes. *BioScience* 68 (6): 427-435. <https://doi.org/10.1093/biosci/biy040>
- WANG Y., PAN Y., PARSONS S., WALKER M. & ZHANG S. 2007. — Bats respond to polarity of a magnetic field. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 274 (1627): 2901-2905. <https://doi.org/10.1098/rspb.2007.0904>
- WILCOX B. & WHITE E. 2016. — Computational analysis of insect impingement patterns on wind turbine blades: computational analysis of insect impingement patterns. *Wind Energy* 19 (3): 483-495. <https://doi.org/10.1002/we.1846>

- WORBOYS G. L., FRANCIS W. L. & LOCKWOOD M. 2010. — *Connectivity Conservation Management: a Global Guide*. IUCN World Commission on Protected Areas (WCPA), Londres, 480 p.
- XU X., XIE Y., QI K., LUO Z. & WANG X. 2018. — Detecting the response of bird communities and biodiversity to habitat loss and fragmentation due to urbanization. *Science of The Total Environment* 624: 1561-1576. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.143>
- ZIMMERLING J. R., POMEROY A. C., D'ENTREMONT M. V. & FRANCIS C. M. 2013. — Canadian estimate of bird mortality due to collisions and direct habitat loss associated with wind turbine developments. *Avian Conservation and Ecology* 8 (2): 10. <https://doi.org/10.5751/ACE-00609-080210>
- ZUCCA M. 2015. — *La migration des Oiseaux. Comprendre les voyageurs du ciel*. Sud-Ouest Éditions, Bordeaux, 350 p.
- ZYSK-GORCZYŃSKA E., SKÓRKA P. & ŻMIHORSKI M. 2020. — Graffiti saves birds: a year-round pattern of bird collisions with glass bus shelters. *Landscape and Urban Planning* 193: 103680. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2019.103680>

Soumis le 30 juin 2020;
 accepté le 22 juin 2021;
 publié le 8 juin 2022.

ANNEXE

ANNEXE 1. — Recherche bibliographique standardisée préliminaire.

CARACTÉRISTIQUES DE LA RECHERCHE

Date de la recherche : 18 juin 2021

Base de littérature : Web of Science Core Collection (<https://www.webofscience.com/wos/woscc/basic-search>, dernière consultation le 30 juin 2020)

Période recherchée : 1956-2021

Restrictions appliquées (thématiques de recherche, types de documents, language, etc.) : Aucune

ÉQUATIONS DE RECHERCHE (TI = Titre, recherche dans le titre de l'article seulement)

Catégorie	Focus	Équation de recherche spécifique
Population	Oiseaux Chauves-souris Insectes	TI = (bird\$ OR avian OR raptor\$) TI = (bat\$ OR chiroptera*) TI = (insect\$)
Exposition	Aéronefs Bâti Éoliennes Lignes électriques	TI = (aircraft\$ OR airplane\$ OR aeroplane\$ OR helicopter\$ OR airjet\$) TI = (building\$ OR construction\$ OR house\$ OR habitation\$ OR wall\$ OR window\$ OR glass OR glasses OR pane\$) TI = ("wind turbine\$" OR "wind-turbine\$" OR "wind farm\$" OR "wind-farm\$" OR "wind power generator\$" OR "wind facilit*" OR "wind energy") TI = ("transmission line\$" OR "transmission-line\$" OR "powerline\$" OR "power-line\$" OR "power line\$" OR "electric line\$" OR "electricity line\$" OR "electrical line\$" OR "electric pylon\$" OR "electricity pylon\$" OR "electrical pylon\$")
Mesures	Mortalité/Impacts	TI = (incident\$ OR accident\$ OR damage\$ OR injury OR injuries OR shock\$ OR casualt* OR hazard\$ OR crash* OR collision\$ OR kill* OR fatalit* OR mortalit* OR strike\$ OR striking OR carcass* OR obstacle\$ OR electrocution\$ OR barotrauma\$ OR avoid* OR disturbance\$ OR barrier OR "habitat fragmentation" OR "habitat loss")

RÉSULTATS

	Chauves-souris	Insectes	Oiseaux
Aéronefs	2	2	100
Bâti	2	5	79
Éoliennes	97	3	99
Lignes électriques	0	0	57