

Éoliennes

& *biodiversité*

Synthèse des connaissances
sur les impacts et les moyens
de les atténuer



Éoliennes et biodiversité

Synthèse des connaissances sur les impacts
et les moyens de les atténuer

Citation recommandée :

Gaultier, S.P., Marx, G., & Roux, D., 2019. *Éoliennes et biodiversité : synthèse des connaissances sur les impacts et les moyens de les atténuer*. Office national de la chasse et de la faune sauvage/LPO. 120 p. https://eolien-biodiversite.com/IMG/pdf/lpo_oncfs_2019.pdf

Éoliennes et biodiversité

Synthèse des connaissances sur les impacts et les moyens de les atténuer

Synthèse réalisée par Simon P. Gaultier – ONCFS

(simon.gaultier@outlook.com) ;

Geoffroy Marx – LPO

(geoffroy.marx@lpo.fr)

et Denis Roux – ONCFS

(denis.roux@oncfs.gouv.fr ou doc@oncfs.gouv.fr)



AGIR pour la
BIODIVERSITÉ





Remerciements	6
Liste des sigles et acronymes	7
Résumé	8
Abstract	9
Avant-propos	10
Introduction – Pourquoi une telle synthèse ?	13



1 Contexte éolien en France et en Europe	15
1.1 Transition énergétique	16
1.2 Objectifs européens et nationaux	17
1.3 État des lieux des parcs français et européen	19
1.4 Cadre réglementaire	22



2 Impacts de l'éolien sur la biodiversité	27
2.1 Impacts positifs sur l'environnement	28
2.2 Impacts négatifs	29



3 Atténuation des impacts sur la biodiversité	51
3.1 Pré-diagnostic : recherche de l'emplacement du site	52
3.2 Phase de diagnostic : l'étude d'impact	59
3.3 Éolien en mer	94
3.4 Conclusion	95



4 Conclusion générale	97
------------------------------------	----



Annexes	
Bibliographie	102
Table des tableaux et figures	117
Table des matières	118

Remerciements

La présente synthèse a été réalisée par la Ligue pour la protection des oiseaux et l'Office national de la chasse et de la faune sauvage, Direction de la recherche et de l'expertise, Unité avifaune migratrice.

Les auteurs remercient particulièrement Fanny Allindre (ONCFS), Julia Level (ONCFS), Lucile Tesnière (ONCFS), Richard Rouxel (ONCFS), Matthieu Guillemain (ONCFS), Jean-François Julien (MNHN), Kévin Barré (MNHN), Yannick Beucher (SFEPM), Pierre Bourdier (FEE) pour leur aide, leur relecture et les conseils apportés.

Merci également à Thibault Dazin (Direction générale de l'aviation civile) et Sabrina Foli (Auddicé) pour leurs conseils.

Crédit photo de couverture

Jack Bartholmai, USGS photo of Sandhill Cranes flying in front of a windmill.

Liste des sigles et acronymes

ADEME	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie	NOTRe (loi)	Loi portant nouvelle organisation territoriale de la république
APB	Arrêté de protection de biotope	NWCCMS	<i>National Wind Coordinating Collaborative Mitigation Subgroup</i>
APPB	Arrêté préfectoral de protection de biotope	ONCFS	Office national de la chasse et de la faune sauvage
ATOM	<i>Acoustic-thermographic offshore monitoring system</i>	ONF	Office national des forêts
BACI	<i>Before-after control-impact</i>	PN	Parc national
CEFE – EPHE	Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive – École pratique des hautes études	PNR	Parc naturel régional
DREAL	Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement	POPE (loi)	Loi de programme fixant les orientations de la politique énergétique
EIE	Étude d'impact sur l'environnement	PPE	Programmation pluriannuelle de l'énergie
ENS	Espace naturel sensible	RASOD	<i>Radar Assisted Shutdown on Demand</i>
ERC	Éviter, réduire, compenser	RBD	Réserve biologique dirigée
FEE	France énergie éolienne	RBI	Réserve biologique intégrale
GPS	<i>Global Positioning System</i>	RCFS	Réserve de chasse et de faune sauvage
GWEC	<i>Global Wind Energy Council</i>	RNCFS	Réserve nationale de chasse et de faune sauvage
ICPE	Installation classée pour la protection de l'environnement	RNN	Réserve naturelle nationale
IKA	Indice kilométrique d'abondance	RNR	Réserve naturelle régionale
IPA	Indice ponctuel d'abondance	SER	Syndicat des énergies renouvelables
IRA	Indice relatif d'abondance	SFEPM	Société française pour l'étude et la protection des mammifères
LPO	Ligue pour la protection des oiseaux	SRADDET	Schéma régional d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires
MAAPRAT	Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche, de la Ruralité et de l'Aménagement du territoire	SRCAE	Schéma régional climat air énergie
MEDDE	Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie	SRE	Schéma régional éolien
MEDDTL	Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement	TADS	<i>Thermal Animal Detection System</i>
MEEDDM	Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer	UE	Union européenne
MEEM	Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer	UV	Ultraviolet
MLETR	Ministère du Logement, de l'Égalité des territoires et de la Ruralité	UVS	<i>Ultraviolet-Sensitive</i>
MNHN	Muséum national d'histoire naturelle	VARS	<i>Visual Automated Recording System</i>
MTES	Ministère de la Transition écologique et solidaire	VS	<i>Violet-Sensitive</i>
MW	Mégawatt	ZDE	Zone de développement de l'éolien
		ZICO	Zone d'importance pour la conservation des oiseaux
		ZNIEFF	Zone naturelle d'intérêt écologique, faunistique et floristique
		ZPS	Zone de protection spéciale
		ZSC	Zone spéciale de conservation

Résumé

Le développement de l'éolien est à la fois un pilier de la transition énergétique et un vecteur d'impacts potentiels pour la biodiversité. Bien que l'énergie éolienne soit destinée à se substituer à des énergies polluantes, émettrices de gaz à effet de serre (GES) ou présentant de forts risques pour l'environnement, elle peut, elle aussi, avoir un impact de diverses manières sur la faune, la flore et les habitats.

La loi pour la reconquête de la biodiversité¹ conforte la séquence dite ERC introduite en droit français par la loi relative à la protection de la nature de 1976² ; séquence qui consiste à « éviter les atteintes à la biodiversité, à défaut les réduire et, en dernier recours, compenser les impacts résiduels » (éviter-réduire-compenser). Dans le domaine de l'éolien, de nombreuses mesures existent pour mettre en œuvre une séquence ERC exemplaire. Une synthèse des connaissances actuelles a donc été réalisée afin de mieux caractériser ces impacts et leurs facteurs d'influence, et de mettre en avant les méthodes et technologies utilisées pour les atténuer.

Les oiseaux et les chiroptères sont reconnus comme étant les taxons les plus sensibles au développement des parcs éoliens. Ces derniers peuvent provoquer des collisions avec des individus en vol, des pertes et fragmentations d'habitats ou des perturbations comportementales, toutes liées à la présence d'aérogénérateurs et à leurs lieux d'implantation. Les groupes les plus vulnérables semblent être les oiseaux et chiroptères migrateurs, les rapaces ainsi que les chauves-souris de haut vol.

Cela ne veut toutefois pas dire que les autres taxons ne peuvent pas être affectés par l'éolien : amphibiens, mammifères, plantes, etc. sont vulnérables face à la dégradation de leurs habitats.

Une planification à large échelle prenant réellement en compte les enjeux de biodiversité est la mesure la plus efficace pour sélectionner les sites et éviter des impacts. À l'échelle de chaque projet, la bonne conduite du pré-diagnostic et de l'étude d'impact est, elle aussi, indispensable pour identifier correctement les enjeux et proposer des mesures d'atténuation adaptées : choix du nombre, du gabarit et de la localisation fine des éoliennes, gestion appropriée des habitats proches, etc.

L'asservissement des éoliennes peut également participer à la réduction des risques de collision pendant les périodes de risque définies sur la base de paramètres environnementaux ou par des détecteurs en temps réel. Ces détecteurs peuvent, en outre, être couplés avec des systèmes de dissuasion acoustique ou visuelle, afin d'éloigner les individus évoluant à proximité.

Pour finir, plusieurs problématiques ont été identifiées, sur lesquelles les exploitants, écologues et chercheurs devraient se concentrer ; notamment le besoin d'améliorer les études d'impacts pour les chiroptères, de tester différentes méthodes d'atténuation ou d'harmoniser les protocoles de suivis environnementaux, afin de pouvoir collecter et analyser les résultats à l'échelle nationale et internationale.

1. Loi n° 2016-1087 du 8 août 2016 pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages.

2. Loi n° 76-629 du 10 juillet 1976 relative à la protection de la nature.

Abstract

The development of wind power is both a key aspect of energy transition and a cause of potential impact on biodiversity. Whilst wind power aims to replace energy sources which give rise to pollution, greenhouse gases and other serious environmental hazards, it may also impact in various ways upon fauna, flora and habitat.

The French Recovery of Biodiversity, Nature and Landscapes Act¹ builds on the “avoid, reduce, compensate” principle set out in the earlier Nature Conservation Act of 1976², specifying that “biodiversity damage should be avoided, failing that, reduced, and as a last resort, any residual impact should be compensated”. In the wind power sector, numerous measures are in place to implement an exemplary avoid-reduce-compensate process. An overview of current knowledge on the subject has therefore been conducted in order to better determine these impacts and their influencing factors and to highlight methods and technologies used to help limit them.

Birds and bats have been identified as the taxa most affected by wind farm developments. The presence and siting of wind farms can lead to individual creatures colliding with them in flight, to loss and fragmentation of habitat and to behavioural disturbances. The most vulnerable groups seem to be migratory bats and birds, raptors and high-flying bats.

This does not however mean that other taxa may not be affected by wind power sites: amphibians, mammals, plants, etc. are all vulnerable to habitat degradation.

A large-scale strategic planning process which takes full account of current biodiversity issues is the most effective way to select sites and avoid any adverse impacts. A well-run pre-diagnosis and impact study is also vital to the correct identification of the issues facing each project and for proposing the appropriate mitigation measures: decisions on the number, scale and precise location of wind turbines, the appropriate management of the local environment, etc.

Wind turbine servo-control systems can also be used to reduce the risk of collision during high-risk periods (e.g. migration) based on environmental parameters or using real-time detectors. Moreover, when used in conjunction with acoustic or visual deterrent systems, these detectors can help prevent individual creatures flying near to them.

Finally, several issues have been detected which may be of interest to farmers, environmentalists and researchers, namely the need to improve bat impact studies, to test different harm reduction methods and to harmonise environmental monitoring protocols, which would enable the collection and analysis of results at national and international level.

1. The French Recovery of Biodiversity, Nature and Landscapes Act no. 2016-1087 of 8 August 2016.

2. The French Nature Conservation Act no. 76-629 of 10 July 1976.

Avant-propos

Les conséquences alarmantes des activités humaines sur les milieux, le climat et la biodiversité imposent aujourd'hui un changement de nos modes de production et de consommation. Dans ce cadre, la sobriété et l'efficacité énergétiques apparaissent comme des corollaires à la sortie des énergies fossiles et du nucléaire. Le développement des énergies renouvelables, nécessaire et inéluctable, est une opportunité mais aussi un défi : il nécessite en effet de considérer l'ensemble des effets, y compris indésirables, et souvent difficiles à évaluer.

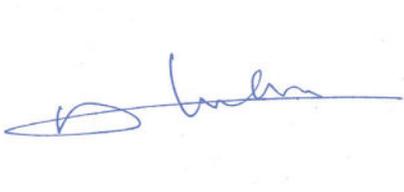
L'énergie éolienne est aujourd'hui l'alternative la plus développée. Certains projets d'implantation d'aérogénérateurs suscitent conflits et inquiétudes, en particulier en raison de leurs impacts potentiels sur les oiseaux et les chauves-souris. À cet égard, un important corpus de connaissances est disponible pour permettre de mieux anticiper les conséquences des éoliennes pour la faune sauvage. Cependant, ces informations restent souvent dispersées dans la littérature scientifique et technique, ce qui complique leur mobilisation dans le processus « éviter-réduire-compenser » pourtant prévu par la loi.

La Ligue pour la protection des oiseaux (LPO) et l'Office national de la chasse et de la faune sauvage (ONCFS) sont des acteurs reconnus de la conservation de la nature, à la fois producteurs de connaissance et experts mobilisés par les pouvoirs publics. Les deux structures sont fréquemment sollicitées pour fournir une expertise en amont de l'installation de parcs éoliens. Il était donc naturel que les deux établissements collaborent pour rassembler, analyser puis partager l'ensemble des informations aujourd'hui disponibles sur les effets indésirables potentiels des aérogénérateurs, et les moyens de les réduire.

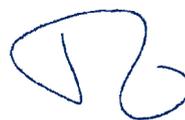
À l'issue d'un très important effort de synthèse, Geoffroy Marx (LPO), Denis Roux (ONCFS) et Simon Gaultier (ONCFS) présentent ainsi au sein d'un seul et même ouvrage les résultats de dizaines d'années de travaux scientifiques menés à travers le monde. Le document se focalise sur l'éolien terrestre, le seul mis en œuvre de manière commerciale en France pour le moment. Il permet de mieux appréhender les deux principales menaces que représentent les éoliennes pour les oiseaux et les chauves-souris : le risque de collision, pour les espèces ayant des difficultés à détecter ou à éviter les éoliennes, voire qui sont attirées par elles, et le dérangement que les parcs peuvent engendrer, qui s'apparente à une perte d'habitat. L'ouvrage recense en outre les solutions pour atténuer ces impacts et les lacunes dans nos connaissances, se voulant ainsi une feuille de route pour la poursuite des études scientifiques dans les années à venir.

Nous espérons conjointement que ce travail sera utile à un développement plus harmonieux et apaisé de la filière éolienne en France, s'appuyant sur des bases scientifiques solides et prenant en compte de manière appropriée les enjeux liés à la préservation de la faune sauvage.

Le Directeur général
de la LPO
Yves Verilhac



Le Directeur général
de l'ONCFS
Olivier Thibault





Pourquoi une telle synthèse ?

L'énergie éolienne est l'une des composantes majeures de la politique de transition énergétique et de développement des énergies renouvelables en France, traduite en droit français par la loi « Grenelle II » du 12 juillet 2010 puis la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte du 17 août 2015. La programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) établit les objectifs à atteindre pour l'éolien terrestre (15 000 mégawatts (MW) en 2018 et entre 21 800 et 26 000 MW d'ici 2023) et pour l'éolien en mer (3 000 MW d'ici 2023).

Le développement de l'éolien n'est pas sans conséquence sur la biodiversité, en particulier sur les oiseaux et les chauves-souris. Il peut, en effet, générer des impacts directs (collision et barotraumatisme) ou indirects (pertes ou modification d'habitats, modification de comportement et dérangements). Les espèces longévives, à faible taux de reproduction et dans un mauvais état de conservation, sont plus sensibles aux impacts de l'éolien que les autres. C'est vrai pour certaines espèces d'oiseaux et pour la plupart des espèces de chauves-souris. Pour les espèces en déclin déjà soumises à nombre de pressions anthropiques, les impacts directs et indirects des éoliennes ont encore un effet cumulatif et peuvent s'avérer problématiques pour la conservation de leurs populations et pour le maintien des services écosystémiques associés.

Parallèlement, la loi pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages fixe l'objectif d'absence de perte nette de biodiversité, et incite à tendre vers un gain de biodiversité.

Les transitions énergétique et écologique qui visent, d'une part, à lutter contre les changements climatiques et, d'autre part, à lutter contre l'érosion de la biodiversité ne peuvent se faire l'une sans l'autre, c'est pourquoi la LPO et l'ONCFS se sont investis depuis une vingtaine d'années dans l'étude de l'impact des éoliennes et la mise en œuvre de mesures visant à améliorer l'intégration environnementale des parcs éoliens.

Cette publication fait suite et complète celles réalisées en 2004 par l'Office national de la chasse et de la faune sauvage et la LPO (LPO, 2004 ; Roux *et al.*, 2004). Elle a pour objectif d'actualiser les connaissances disponibles sur les impacts potentiels des éoliennes et les moyens disponibles pour les éviter ou les réduire.

Les éléments présentés dans ce document résultent d'une analyse de plus de 340 références bibliographiques qui ont été réparties en trois chapitres :

- le contexte éolien en France et en Europe (la transition énergétique, les objectifs européens et nationaux et le cadre réglementaire) ;
- les impacts potentiels des éoliennes sur la biodiversité : les impacts positifs sur l'environnement et les impacts négatifs sur les oiseaux, les chiroptères et les habitats ;
- l'atténuation de ces impacts lors de la planification, du développement, de la construction et de l'exploitation des parcs.

Les informations ont été recueillies *via* la consultation de la base de données ONCFS à Saint-Benoist (Auffargis), de celle de la LPO à Rochefort, de différentes revues scientifiques nationales et internationales et en utilisant différents moteurs de recherche sur Internet.

Compte tenu de la richesse de la bibliographie et de son évolution permanente, il est possible que certains ouvrages n'aient pas été pris en compte. Ainsi, les informations que contient ce document pourront être complétées au cours du temps, notamment en fonction de l'évolution des connaissances acquises à la fois sur ces espèces et sur les techniques de suivi et de réduction des impacts à partir d'analyses de nouvelles données à l'échelle nationale et internationale.



© Philippe Massit/ONCFS

Contexte éolien en France et en Europe

1.1 Transition énergétique

La transition énergétique vise à anticiper l'épuisement des ressources fossiles et fissiles, à réduire les émissions de gaz à effet de serre et à améliorer l'indépendance énergétique en misant sur un bouquet d'énergies renouvelables disponibles localement. Elle s'appuie sur une réduction de la demande d'énergie obtenue notamment par la promotion de l'efficacité et de la sobriété énergétique.

Ce changement profond dans les modes de production et de consommation de l'énergie, amorcé suite au Sommet de Rio¹ (1992) puis au Protocole de Kyoto (1995) et décliné en France par la loi de programmation fixant les orientations de la politique énergétique (POPE) du 13 juillet 2005, est véritablement lancé en France en 2015 (loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte). Cette transition énergétique se concrétise par six engagements :

- réduire les émissions de gaz à effet de serre pour contribuer à l'objectif européen de baisse de 40 % de ces émissions en 2030 (par rapport à la référence 1990) ;
- diminuer de 30 % notre consommation d'énergies fossiles en 2030 ;
- ramener la part du nucléaire à 50 % de la production d'électricité en 2025 ;
- porter la part des énergies renouvelables à 32 % de la consommation énergétique finale en 2030 et à 40 % de la production d'électricité ;
- diviser par deux notre consommation énergétique finale d'ici à 2050 (par rapport à 2012) ;
- diminuer de 50 % le volume de déchets mis en décharge à l'horizon 2050.

L'Union européenne et ses pays membres ont eux aussi lancé « leur » transition énergétique.

Dans ce cadre, les énergies renouvelables et l'éolien en particulier sont censés occuper une place prépondérante.

1. Conférence des Nations unies sur l'environnement et le développement (Rio de Janeiro, 1992).

1.2 Objectifs européens et nationaux

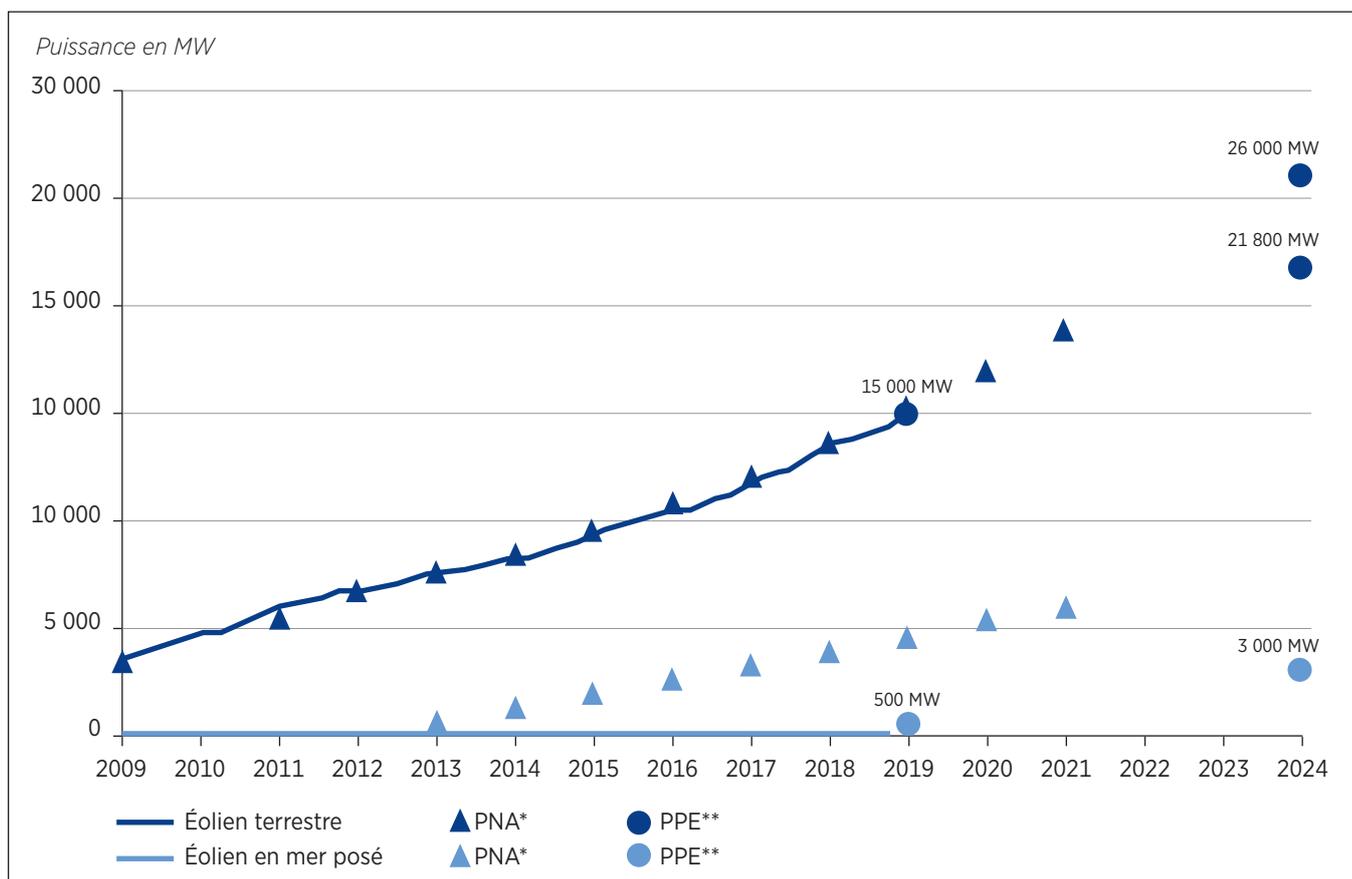
1.2.1 En France

Selon la loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte, les derniers objectifs de la France en matière d'énergies renouvelables sont :

- d'augmenter leur part à 23 % de la consommation finale brute d'énergie en 2020, et à 32 % en 2030 ;
- d'augmenter leur part à 40 % de la production d'électricité.

Pour cela, l'éolien terrestre doit atteindre une puissance de 15 000 MW en 2018 (objectif atteint), et entre 21 800 et 26 000 MW en 2023 (**figure 1** ; SDES, enquête n° 170, février 2019) ; ce qui implique que 2 600 à 4 500 éoliennes s'ajoutent aux 7 500 éoliennes existantes entre 2018 et 2023.

Figure 1 – Évolution de la puissance éolienne installée en France (d'après SDES, enquête n° 170, février 2019)



* Trajectoire prévue jusqu'en 2020 par le plan national d'actions en faveur des énergies renouvelables (PNA EnR), dans le cadre de la directive 2009/28/CE relative à la promotion de l'utilisation des énergies renouvelables.

** La programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) prévoit un premier objectif de puissance installée pour fin 2018 et deux options (haute et basse) pour fin 2023 (voir décret n° 2016-1442 du 27 octobre 2016).

Champ : métropole et DOM

1.2.2 Dans l'Union européenne

L'UE a elle aussi fixé ses objectifs pour « sa » transition énergétique et le développement des énergies renouvelables. Les objectifs de 2020 devraient d'ailleurs être atteints.

Objectifs pour 2020 :

- réduire les émissions de gaz à effet de serre d'au moins 20 % par rapport aux niveaux de 1990 ;
- faire passer à 20 % la part de l'énergie issue de sources renouvelables ;
- améliorer de 20 % l'efficacité énergétique.

Objectifs pour 2030 :

- réduire de 40 % les émissions de gaz à effet de serre ;
- faire passer à 27 % au moins la part de l'énergie issue de sources renouvelables ;
- améliorer de 27 à 30 % l'efficacité énergétique ;
- atteindre 15 % d'interconnexion électrique (autrement dit, 15 % de l'électricité générée dans un pays de l'UE pourra être transférée ailleurs dans l'UE).

Objectif pour 2050 :

- réduire de 80 à 95 % les émissions de gaz à effet de serre par rapport aux niveaux de 1990. La feuille de route pour l'énergie à l'horizon 2050 décrit les mesures à prendre pour atteindre cet objectif.

1.3 État des lieux des parcs français et européen

1.3.1 En France

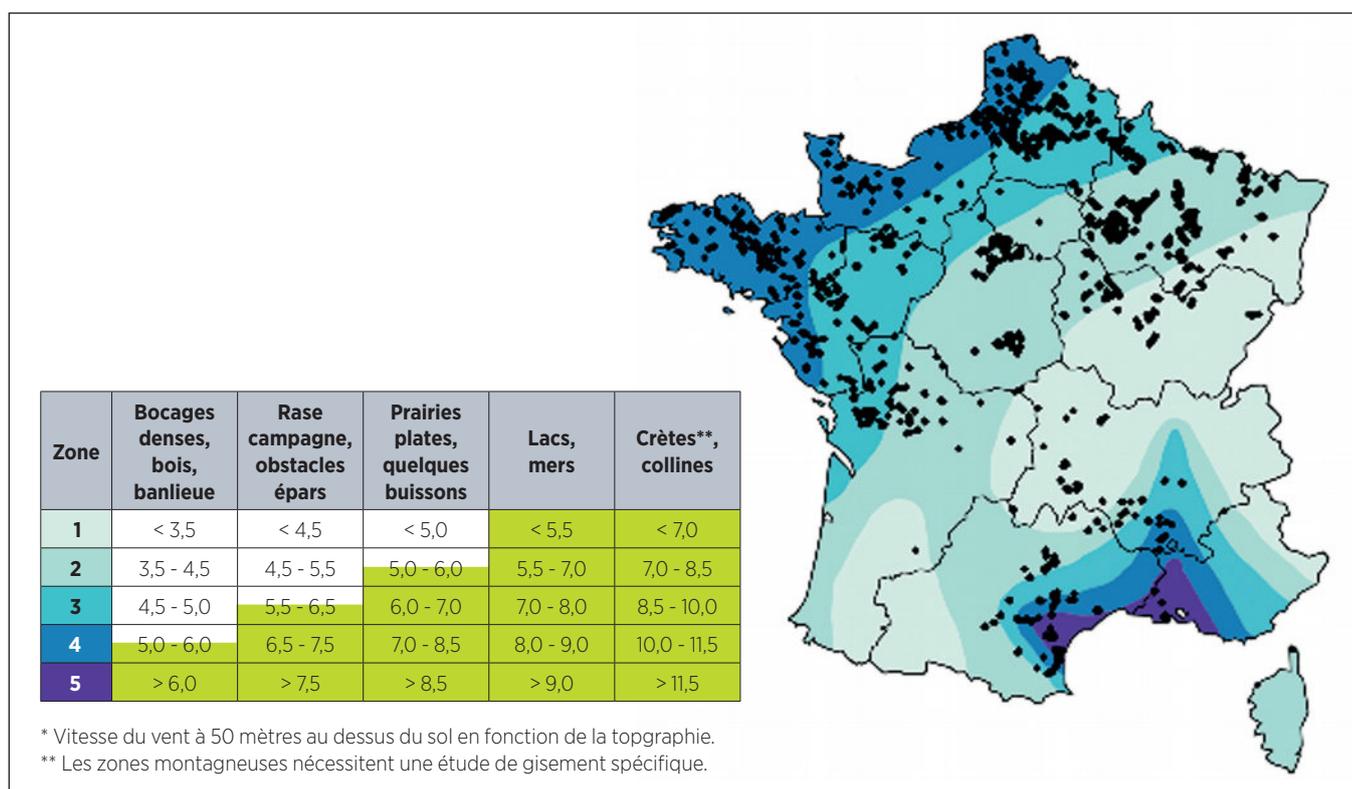
À la fin de l'année 2018, 591 GW étaient en service dans le monde, dont 179 GW en Europe et 15 GW en France (EurObserv'ER, 2019).

Un récent rapport de la LPO sur l'éolien et ses impacts sur les oiseaux (Marx, 2017) a permis de recenser l'ensemble des éoliennes implantées en France. Fin 2016, le pays accueillait environ 5 760 éoliennes réparties sur 802 parcs comptant en moyenne chacun 7,7 éoliennes d'une hauteur moyenne de 120 m (80 m de tour, 40 m de pale). La hauteur moyenne en bout de pales augmente chaque année (Marx, 2017) : des éoliennes de 193 m de hauteur ont été mises en service dans le Jura en 2018.

En parallèle, la surface balayée par les pales (diamètre du rotor) a elle aussi augmenté et été multipliée par 3,3 entre 2000 et 2015. Actuellement, c'est davantage le diamètre du rotor qui contribue à l'augmentation des gabarits des machines que la hauteur du mât, qui augmente moins vite depuis 2006.

L'emplacement des premiers parcs a principalement été dicté par le gisement éolien, les orientant ainsi vers le littoral méditerranéen puis les côtes de la Manche, avant de voir les grandes plaines agricoles de la Champagne-Ardenne, de la Bourgogne ou de la Lorraine accueillir à leur tour des projets avec des machines plus grandes, permettant de mieux capter les vents (**figures 2 et 3**).

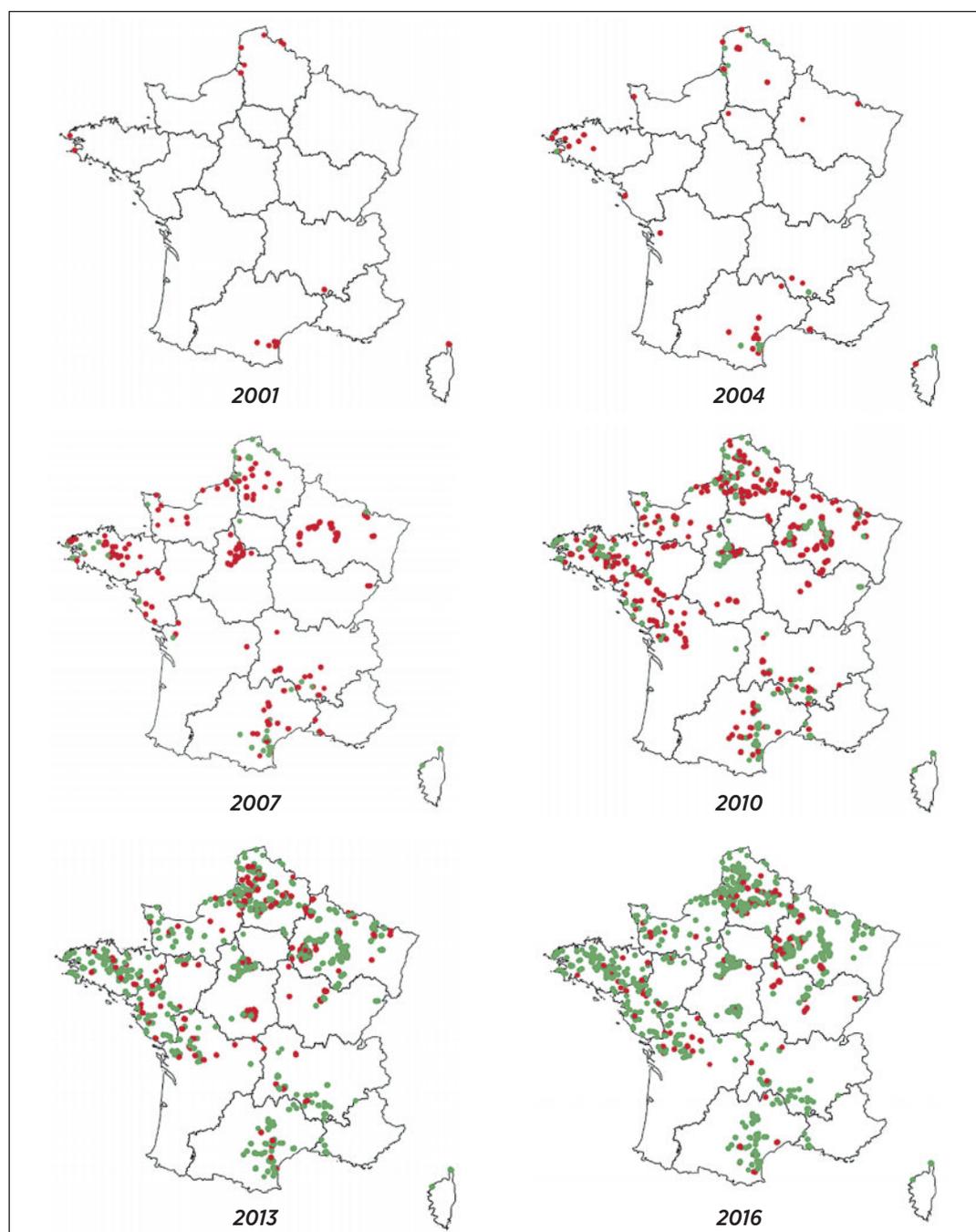
Figure 2 – Localisation des parcs éoliens français en fonction du gisement éolien (dans le tableau, vitesse du vent* en m/s) au 1^{er} avril 2016. Les données de vitesse de vent proviennent de l'ADEME (2011), celles des parcs éoliens proviennent de Marx (2017)



Par conséquent, les habitats utilisés pour implanter des parcs éoliens ont eux aussi changé au fil des années : d'abord installés sur le littoral, dans le bocage (60,6 % des parcs en milieu forestier en 2000, 12,8 % en 2015), ils ont ensuite été placés en plaine agricole (17 % des parcs en 2000, 78,9 % en 2015). Ce changement est pour une part le résultat de demandes plus rigoureuses de la part des services instructeurs de l'État – classement des éoliennes en ICPE (Installation classée pour la protection de l'environnement), mise en place de la séquence « éviter, réduire, compenser » (ERC) – mais aussi d'une prise en compte accrue de la biodiversité en général (Marx, 2017).

Avec l'augmentation des gabarits des aérogénérateurs, permettant de générer de l'électricité avec de plus faibles vitesses de vent mais aussi d'atteindre les vents d'altitude, il est envisageable de voir les développeurs se tourner vers de nouveaux territoires au potentiel éolien plus faible.

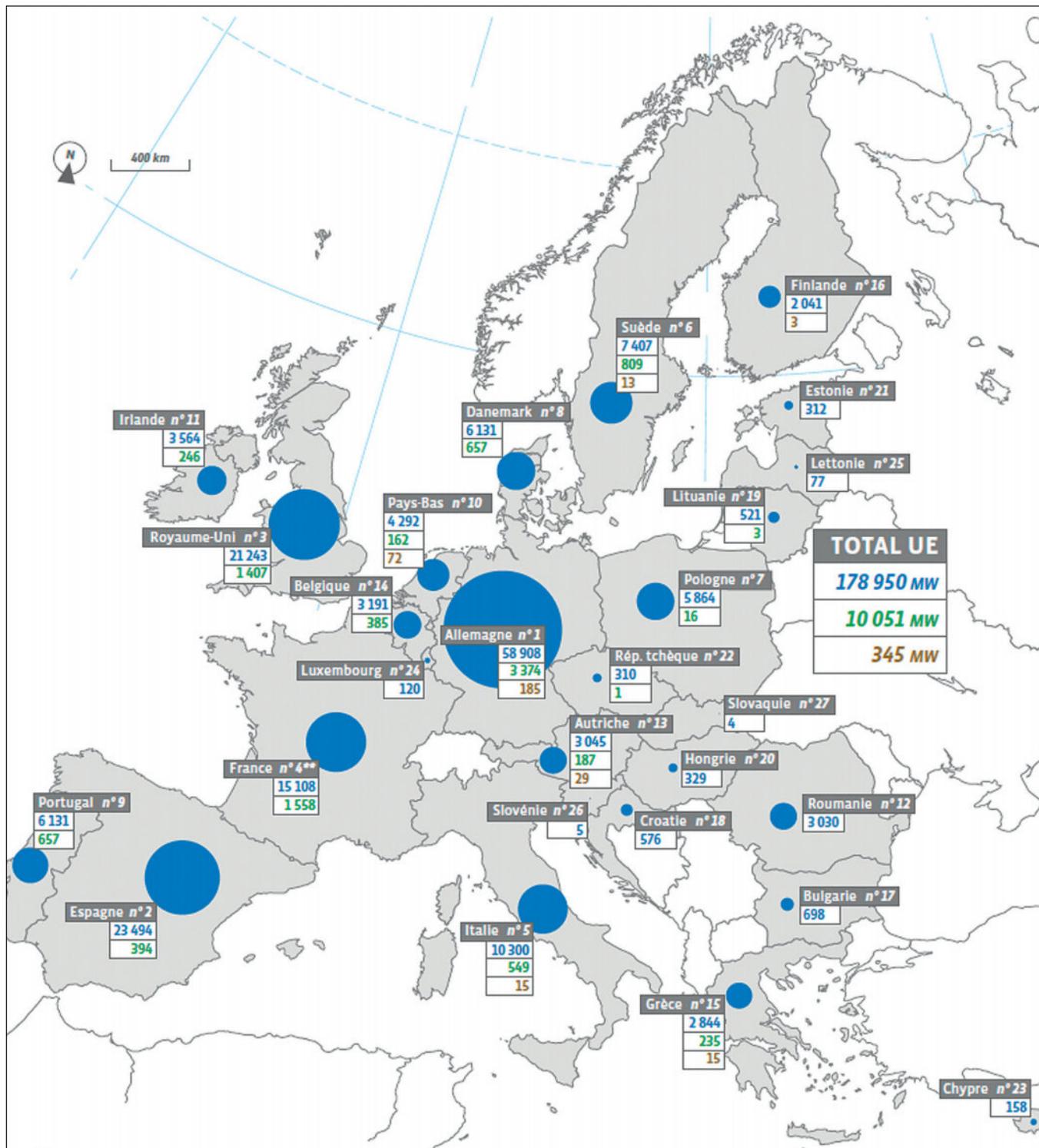
Figure 3 – Implantation des parcs au cours du temps. En rouge les parcs apparus lors de la dernière période, en vert ceux apparus lors des périodes précédentes



1.3.2 Dans le reste de l'Europe

Avec sa puissance installée de 15 108 MW fin 2018 (Eurobserv'ER, 2019), la France figure au quatrième rang européen, derrière l'Allemagne, l'Espagne et le Royaume-Uni (**figure 4**).

Figure 4 – Puissance éolienne installée dans l'Union européenne fin 2018* (en MW). En **bleu**, la puissance cumulée installée dans les pays de l'UE fin 2016 (en MW) ; en **vert**, la puissance installée durant l'année 2018 dans les pays de l'UE (en MW) ; en **marron**, la puissance mise hors-service durant l'année 2018 (en MW)



* Estimation.

** Départements d'outre-mer non inclus pour la France.

Source : EurObserv'ER, 2019.

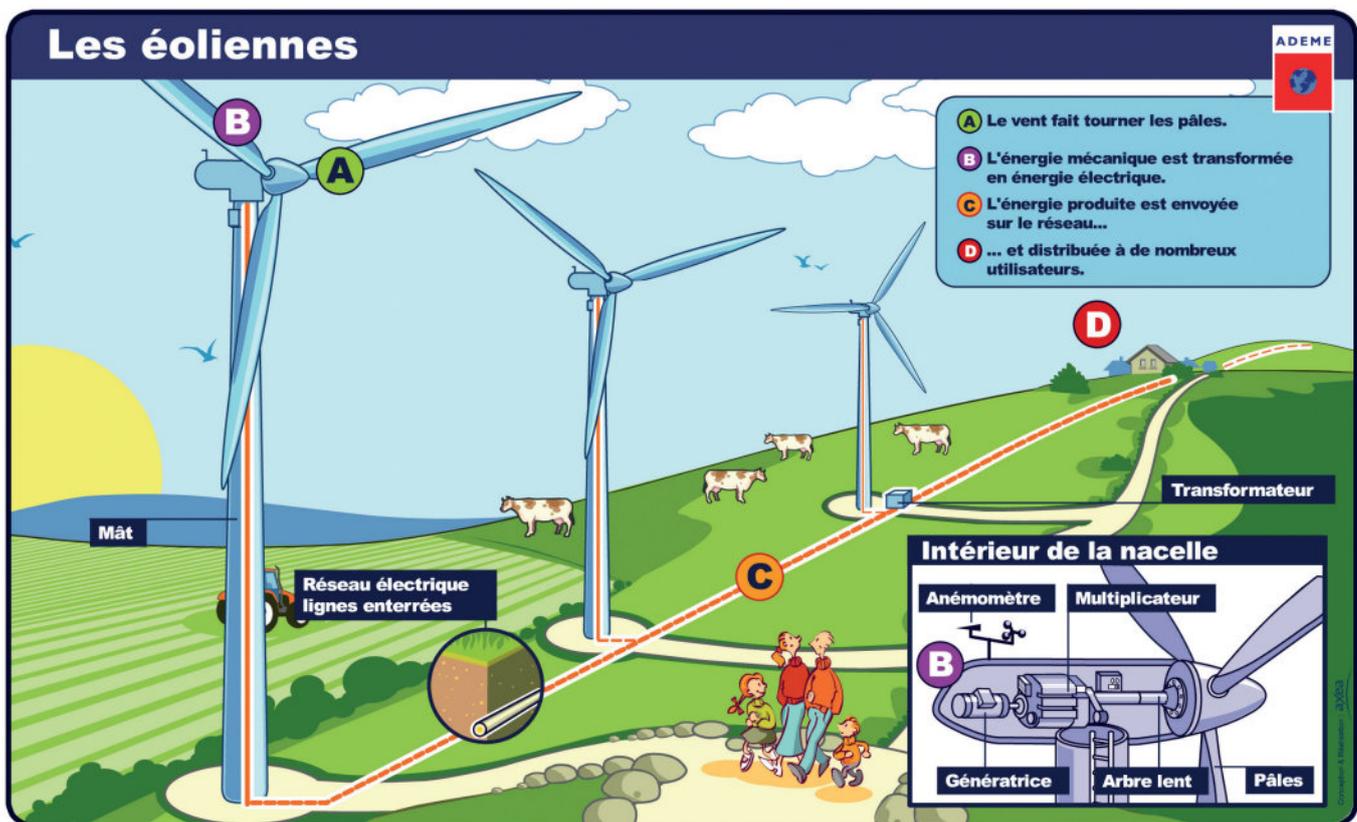
1.4 Cadre réglementaire

1.4.1 Définition d'un parc éolien

Un parc éolien, une centrale éolienne ou ferme éolienne, est un site regroupant une ou plusieurs éoliennes raccordées à un même poste de livraison électrique et destinées à produire de l'électricité à partir de l'énergie cinétique du vent.

Les éoliennes étant généralement implantées dans des espaces agricoles ou naturels, l'acheminement des éléments des éoliennes (tronçons de mâts, pales, nacelle, etc.) nécessite l'aménagement voire la création de chemins d'accès jusqu'à une plateforme de montage créée pour ériger les machines. Les éoliennes sont reliées à un poste de livraison électrique situé sur le parc puis l'électricité produite est évacuée jusqu'au poste source électrique du gestionnaire de réseau (RTE ou Enedis). Tous ces raccordements sont intégralement enterrés (*figure 5*).

Figure 5 – Composantes d'un parc éolien



Source : Ademe.

1.4.2 Planification

En 2005, la loi POPE introduisait les zones de développement éolien (ZDE), un premier outil que les élus locaux ont utilisé pour définir des espaces prioritaires où la ressource éolienne est importante et les sensibilités environnementales faibles. À partir de 2007, seuls les parcs situés dans ces ZDE bénéficiaient de l'obligation d'achat par EDF de l'électricité produite à un tarif fixé par arrêté ministériel.

Les ZDE ont été supprimées en 2013 au profit des schémas régionaux éoliens (SRE) établis avec les schémas régionaux climat air énergie (SRCAE) pour mieux planifier le développement éolien. Toutefois, la grande majorité d'entre eux a été annulée suite à des décisions de justice.

De plus, la loi n° 2015-991 du 7 août 2015 portant nouvelle organisation territoriale de la République, dite loi NOTRe, amène au remplacement des SRCAE et donc des SRE, d'ici 2019, par les schémas régionaux d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires (SRADDET), qui devraient comporter des outils pour le développement des énergies renouvelables par zones géographiques (MEEM, 2016).

1.4.3 Réglementation concernant les éoliennes

Depuis le 12 juillet 2010 et la loi n° 2010-788 portant engagement national pour l'environnement, dite « Grenelle II », les éoliennes sont considérées comme des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) et sont donc soumises à la législation associée.

Par conséquent, le développement d'un projet éolien est soumis à autorisation si l'ensemble du parc dispose d'une puissance totale supérieure ou égale à 20 MW et qu'au moins une des éoliennes a une hauteur d'au moins 12 m, mât et nacelle compris (mais sans compter les pales). Cette autorisation concerne aussi les éoliennes dont la hauteur du mât et de la nacelle est d'au moins 50 m.

De plus, ce classement en ICPE et l'arrêté du 26 août 2011 relatif aux installations de production d'électricité utilisant l'énergie mécanique du vent au sein d'une installation soumise à autorisation au titre de la rubrique 2980 de la législation des installations classées pour la protection de l'environnement prévoient la mise en place d'un suivi environnemental ayant notamment pour objectif d'estimer la mortalité de l'avifaune et des chiroptères due à la présence des éoliennes. Ce suivi doit être réalisé au moins une fois au cours des trois premières années de fonctionnement du parc puis une fois tous les dix ans.

Le 1^{er} mars 2017, l'autorisation environnementale unique a été mise en place pour faciliter les démarches des porteurs de projet éolien. Ainsi, ce dossier unique regroupe toutes les demandes auparavant effectuées séparément, notamment les demandes d'autorisation de défrichement et de permis de construire, ainsi que les dossiers d'évaluation des incidences « Natura 2000 » (MEEM, 2016).

La pièce centrale de cette demande d'autorisation unique est et reste l'étude d'impact, une étude qui « doit rendre compte des effets potentiels ou avérés sur l'environnement du projet éolien et permet d'analyser et de justifier les choix retenus au regard des enjeux identifiés sur le territoire du projet » (MEEM, 2016).

Ici, l'environnement du projet éolien comprend à la fois (L. 122-1 du Code de l'environnement) :

- la biodiversité, particulièrement les espèces (végétales et animales) et habitats protégés aux titres des directives Habitats (directive 92/43/CEE du Conseil du 21 mai 1992) et Oiseaux (directive 2009/147/CE du 30 novembre 2009) ;
- les terres, le sol, l'eau, l'air et le climat ;
- les biens matériels, le patrimoine culturel et le paysage ;
- la population et la santé humaine ;
- l'interaction entre les facteurs susmentionnés.

L'objectif de l'étude d'impact est donc de protéger cet environnement en apportant au développeur du projet les outils et informations pour tenir compte des enjeux et

sensibilités du site. Le développeur peut ensuite définir les meilleurs paramètres pour son projet lui permettant de respecter au mieux l'environnement humain et naturel (MEEM, 2016).

Qu'ils soient temporaires ou permanents, qu'ils apparaissent en phase de chantier ou lors de la mise en service des machines, les impacts potentiels d'un parc éolien peuvent porter atteinte à des espèces animales ou végétales protégées.

Ainsi, il est important de rappeler que selon l'arrêté du 23 avril 2007 fixant la liste des mammifères terrestres protégés sur l'ensemble du territoire, toutes les espèces de chiroptères présentes sur le territoire métropolitain sont protégées. De la même façon, la plupart des espèces d'oiseaux présents en France métropolitaine sont protégées par l'arrêté du 29 octobre 2009 fixant la liste des oiseaux protégés sur l'ensemble du territoire et les modalités de leur protection.

De par cette protection, il est notamment interdit :

- de détruire, mutiler ou perturber intentionnellement dans leur milieu naturel des individus de ces espèces ;
- de détruire, altérer ou dégrader les aires de repos et sites de reproduction de ces espèces. Cela comporte tout élément physique ou biologique nécessaire, qu'il soit effectivement utilisé ou utilisable à n'importe quel moment des cycles de reproduction et de repos des espèces concernées (MEDDE, 2014).

En plus de cette protection au niveau national, toutes les espèces de chiroptères sont présentes à l'annexe IV de la directive européenne n° 92/43 du 21 mai 1992 concernant la conservation des habitats naturels ainsi que de la faune et de la flore sauvages (directive Habitats, Faune et Flore).

L'avifaune est quant à elle concernée par la directive européenne n° 79/409 du 2 avril 1979, devenue n° 2009/147 du 30 novembre 2009, concernant la conservation des oiseaux sauvages, et qui garantit des mesures de protection à toutes les espèces d'oiseaux vivant à l'état sauvage sur le territoire européen (MEDDE, 2014).

Il est donc primordial de respecter ces interdictions lors du développement d'un projet éolien. Seule une dérogation délivrée selon les conditions de l'article L. 411-2 du Code de l'environnement permet au maître d'ouvrage du projet de passer outre la réglementation concernant les espèces protégées. Cette dérogation est délivrée par l'autorité compétente, c'est-à-dire la direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DREAL).

Cette dérogation est toutefois très encadrée et n'est délivrée qu'à condition qu'aucune autre solution satisfaisante n'existe et qu'elle ne porte pas atteinte au maintien dans un état favorable des populations des espèces concernées. Cette dernière condition sera d'autant plus difficilement remplie que les populations des espèces concernées sont dégradées.

De plus, une raison valable se doit d'être donnée pour obtenir cette dérogation et, pour les projets éoliens, il s'agira d'une délivrance dans « l'intérêt de la santé et de la sécurité publiques ou pour d'autres raisons impératives d'intérêt public majeur, y compris de nature sociale ou économique, et pour des motifs qui comporteraient des conséquences bénéfiques primordiales pour l'environnement » (article L. 411-2 du Code de l'environnement). Il faudra donc justifier du caractère de « raison impérative d'intérêt public majeur » du projet éolien en question face à l'intérêt de protection des espèces.

Toutefois, il est important de préciser que cette dérogation n'est pas obligatoire pour chaque projet : si celui-ci parvient à éviter ou réduire au maximum les impacts sur la biodiversité et les espèces protégées, et donc qu'aucun impact significatif n'est identifié, alors

la demande de dérogation n'est pas à faire. Par conséquent, la demande de dérogation est entièrement séparée du dossier de demande d'autorisation environnementale, et n'en constitue pas une pièce obligatoire (MEDDE, 2014).

Dès lors que, malgré l'application des mesures d'évitement et de réduction, il est constaté un impact sur la permanence des cycles biologiques provoquant un risque de fragilisation de la population impactée, la réalisation du projet de parc éolien justifie l'octroi d'une dérogation à la protection stricte des espèces. De tels impacts résiduels significatifs doivent en outre être compensés dans la logique de maintien ou de rétablissement de l'état de conservation des espèces (Perret, 2018).

Néanmoins, une demande de dérogation à l'interdiction de destruction des espèces n'est pas satisfaite systématiquement, et ne garantit donc pas d'obtenir l'autorisation environnementale, notamment en cas d'impacts non évitables, non réductibles et non compensables (MEDDE, 2014).

Une dérogation à la protection des espèces peut aussi être exigée après la mise en service d'un parc éolien, si des impacts la justifiant sont découverts lors des suivis post-implantation, comme l'apparition sur le site d'une nouvelle espèce protégée jamais détectée jusqu'alors. Cette situation est à anticiper autant que faire se peut. Elle peut être synonyme de lacunes dans l'étude d'impacts, peut causer des complications trop importantes pour mettre en place des mesures complémentaires, et par extension, entraîner l'arrêt des éoliennes (MEDDE, 2014).

Impacts de l'éolien sur la biodiversité



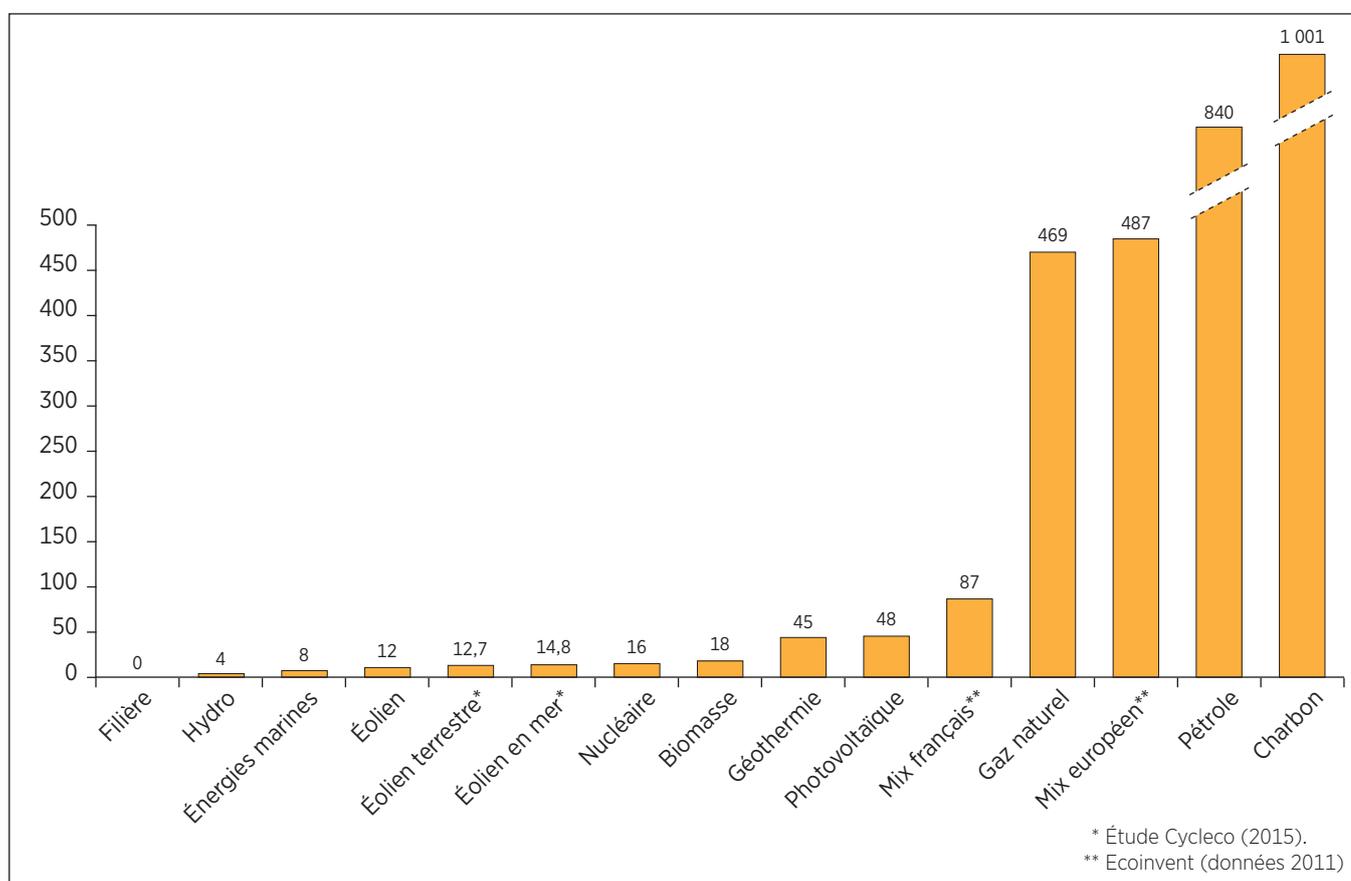
2.1 Impacts positifs sur l'environnement

L'analyse du cycle de vie des éoliennes implantées en France (ADEME, 2016) montre que l'éolien est un moyen efficient de production d'énergie. L'éolien terrestre dispose ainsi d'un temps de retour énergétique¹ de 12 mois et d'un facteur de récolte² de 19 (respectivement 14 mois et facteur 17 pour l'éolien en mer).

Cette même étude conclut également à de faibles impacts sur les compartiments air, sol et eau, la phase de fabrication des composants étant la principale source des impacts, notamment en raison de la consommation d'énergie.

Enfin, elle confirme les faibles émissions de CO₂ des éoliennes, qu'elles soient terrestres (taux d'émission de 12,7 g CO₂ eq/kWh) ou en mer (14,8 g CO₂ eq/kWh). Ces émissions caractérisant les parcs français sont analogues à celles rapportées par les études internationales et sont comparées aux autres filières de production d'électricité dans la **figure 6**.

Figure 6 – Taux d'émission de gaz à effet de serre, en gCO₂/kWh (GIEC, 2011 ; Ecoinvent, 2011 ; Cycleco, 2015)



Dans la perspective d'une transition énergétique de type négaWatt (2017), mettant en avant une réduction de la production d'énergie et une substitution de l'énergie résiduelle, majoritairement fossile et fissile, par des énergies renouvelables, l'éolien apparaît, au regard de ses faibles émissions de CO₂ et de son impact limité sur les compartiments eau, air et sol, comme une ressource particulièrement efficiente.

1. Le retour énergétique permet d'obtenir le taux de rendement énergétique, c'est-à-dire en combien de temps la turbine produit la quantité d'énergie qu'elle a consommée au cours de son cycle de vie.
2. Le facteur de récolte permet de connaître le nombre de fois où l'énergie est amortie, c'est-à-dire le nombre de fois où la turbine produit la quantité d'énergie qu'elle a consommée au cours de son cycle de vie.

2.2 Impacts négatifs

Les publications internationales traitant de l'éolien, de ses impacts potentiels sur la biodiversité et des mesures permettant de les réduire sont nombreuses. La bibliographie du programme national éolien et biodiversité en recense plus de 1 000 issues d'une trentaine de pays.

Ces publications s'accordent sur le fait que les impacts des éoliennes terrestres se concentrent essentiellement sur les habitats (en phase travaux) et sur les vertébrés volants (en phases travaux et d'exploitation). Elles montrent que ces impacts ne sont pas systématiques et qu'ils varient essentiellement en fonction des enjeux présents sur le site d'implantation des éoliennes.

Il convient donc d'utiliser cette bibliographie avec discernement car les différences peuvent être nombreuses, tant du point de vue des habitats et des espèces qui les utilisent que de la typologie même des parcs.

Par exemple (**photo 1**), alors que le parc éolien français « type » est composé de 7 éoliennes de 2 MW implantées dans des plaines agricoles et culminant à 120 m de haut (mât tubulaire de 80 m et pales de 40 m), le parc éolien d'Altamont Pass en Californie, dont il est souvent question dans la littérature, concentre à lui seul environ 5 000 éoliennes – tours en treillis haubanés de 24 m de haut et pales de 9 m de long avec des vitesses de rotation élevées – sur une surface de prairie vallonnée de 165 km², c'est-à-dire pratiquement autant d'éoliennes que toute la France sur une surface inférieure à celle de la commune de Millau (12). Il convient donc d'être extrêmement prudent lorsque l'on se réfère à une publication et de vérifier si les conclusions sont transposables, ou non, à un autre contexte.

Photo 1 – Les parcs éoliens français (photo de gauche) ne ressemblent pas à Altamont Pass aux États-Unis (photo de droite).



© Pixabay



© Alex MacLean

2.2.1 Impacts sur les habitats

À la fin des années 1990, les premières éoliennes françaises ont majoritairement été implantées dans des espaces naturels exposés aux vents méditerranéens et composés à 80 % de maquis, garrigues et prairies naturelles. Par la suite, l'augmentation de la taille des pales, et donc de la surface balayée par les rotors, a permis, dès 2004, d'investir des espaces agricoles moins ventés situés à l'intérieur des terres. Aujourd'hui, environ 80 % des éoliennes mises en service chaque année sont situées en plaine agricole (Marx, 2017). L'accroissement continu de la hauteur des machines permet également de capter les vents en forêt, au-dessus de la canopée.



© Alexis Orseau/LPO

Parcs éoliens de Mazeray-Bignay et des Nouillers (17).

Cette évolution de l'occupation biophysique des sols par les éoliennes entraîne aussi une évolution, vraisemblablement à la baisse, des impacts des parcs éoliens sur les habitats même si la question de l'éolien en forêt reste posée.

2.2.1.1 Impacts directs

L'emprise au sol d'une éolienne n'excède pas 15 à 30 m², mais son implantation nécessite de terrasser sur un rayon de 10 à 15 m (300 à 700 m²) pour réaliser la fondation. Des zones sont également nécessaires pour stocker les terres végétales excavées en périphérie de chaque fondation.

L'érection de l'éolienne suppose également de réaliser une plateforme de 1 000 à 1 500 m² sur laquelle évolueront les engins de chantier et la grue de montage.

Le chantier implique en outre, dans certains cas, d'élargir voire de créer des chemins destinés au passage des convois exceptionnels ; surfaces qui s'ajoutent aux places de parking prévues pour la maintenance ainsi qu'à un ou plusieurs postes de livraison électrique.

Enfin, les éoliennes sont reliées entre elles et au poste de livraison électrique par un réseau câblé enterré. Celui-ci peut être intégré aux voies d'accès évoquées ci-dessus mais peut tout aussi bien relier les éoliennes « au plus court » à travers les parcelles, créant une nouvelle emprise linéaire en phase travaux de plusieurs centaines de mètres entre chaque éolienne.

L'emprise au sol d'un parc éolien peut donc varier sensiblement d'un projet à l'autre, de 1 500 à plus de 3 500 m² par éolienne.

Les parcs développés dans des espaces naturels (forêts, maquis, garrigues, prairies naturelles, etc.) ou dans des paysages de bocage sont souvent plus problématiques pour les habitats (**photos 2 et 3**) car ils peuvent impliquer la dégradation voire la destruction des milieux sur lesquels ils sont implantés (prairies, arbres, buissons, etc.).



Les projets éoliens implantés en plaine agricole peuvent également, dans une moindre mesure, avoir un impact sur les espèces végétales situées à leurs abords, en particulier sur les bordures de chemins, les talus et les fossés qui constituent souvent les dernières niches de biodiversité dans ces vastes espaces soumis aux produits phytosanitaires.

Si les chemins d'accès aux éoliennes, les plateformes de montage et le poste de livraison électrique sont généralement bien pris en compte dans les études d'impact, d'autres emprises liées à la phase de construction le sont beaucoup moins. Il en est ainsi parfois du stockage des terres végétales lors de l'excavation des fondations, du raccordement inter-éoliennes, des zones d'entreposage des éléments d'éoliennes avant montage ou de l'aire d'assemblage de la grue servant à l'érection des éoliennes dont les impacts sont, le plus souvent, temporaires.

Enfin, la phase de démantèlement (**photo 4**) ou de renouvellement du parc (*repowering*) est, elle aussi, source d'impacts potentiels sur les habitats puisqu'elle implique de nouveau l'intervention d'engins de chantier.

Photo 2 – Défrichage dans le cadre d'un projet éolien en Bretagne. Données cartographiques.

Photo 3 – Chantier de construction d'une éolienne à proximité de Vittel dans les Vosges. Le dérangement physique est moindre dans les zones agricoles, mais l'emprise du chantier est ici visible.





© Valorem

Photo 4 –
Démantèlement
d'une fondation
d'éolienne
à Criel-sur-Mer (76).

Le guide de l'étude d'impact sur l'environnement des parcs éoliens terrestres (2010) recense un certain nombre d'effets potentiels d'un parc éolien sur les habitats et la flore :

- dépôt de poussières lors des travaux ;
- emprise, consommation de surface ;
- défrichage, coupe d'arbre isolé ;
- modification des habitats ;
- piétinements des habitats alentour (travaux, promeneurs) et sur-fréquentation des milieux ;
- risques accrus d'incendie ;
- apport d'espèces exogènes invasives ;
- destruction d'espèces protégées (dans ce cas, une demande de dérogation de destruction d'espèce protégée doit être élaborée) ;
- atteinte à stations d'espèces patrimoniales et/ou déterminantes.

La traduction en impacts de ces effets dépend du contexte écologique local et des caractéristiques techniques du projet. L'analyse proportionnée des impacts du parc éolien sur les habitats et la flore se réalise par la confrontation de la sensibilité des habitats avec les données sur les milieux naturels alentour, les données concernant les espèces patrimoniales et les caractéristiques techniques du projet.

À titre d'exemple, une consommation de 100 m² de pelouse sèche, lorsqu'elle appartient à un ensemble de plusieurs milliers de mètres carrés dans une région où cet habitat est courant, n'aura pas le même impact que si cette consommation concerne une pelouse sèche isolée de quelques centaines de mètres carrés. De même, la destruction d'une station d'espèce protégée n'aura pas le même impact si cette espèce présente de multiples stations dans un environnement proche ou si la station affectée est la seule connue dans ce secteur. Une telle destruction demeure toutefois peu envisageable et doit donner lieu, le cas échéant, à une procédure spécifique.

2.2.1.2 Impacts indirects

La destruction ou l'altération des habitats est susceptible de modifier les réseaux trophiques et d'avoir un impact indirect sur les espèces qui utilisent ces sites.

Le *Guide relatif à l'élaboration des études d'impacts des projets de parcs éoliens terrestres* (MEEM, 2016) rappelle que l'isolement des populations animales et, dans une moindre mesure, végétales par fragmentation des milieux contribue fortement à la diminution de la biodiversité. Il est donc primordial d'identifier les interactions existant entre les différents types de milieu, les zones écologiques importantes (« réservoirs de biodiversité ») et les axes d'échanges privilégiés entre ces zones naturelles (« corridors écologiques »).

L'ouverture des milieux peut également créer des zones de chasse favorables pour les rapaces à proximité immédiate des éoliennes et accroître le risque de collision, ce qui est attesté par de nombreuses publications (Smallwood *et al.*, 2007 ; Dürr, 2009 ; Mammen *et al.*, 2011 ; Bellebaum *et al.*, 2013).

Les impacts sur les chiroptères qui découlent de l'altération ou de la destruction d'habitats peuvent être importants, en particulier pour les parcs développés en forêt mixte (Eurobats, 2014). Des habitats de chasse, mais aussi des gîtes peuvent être détruits par le défrichage du site pour construire les éoliennes et les routes d'accès et pour mettre en place les câbles de raccordement au réseau électrique. Si les éoliennes sont installées au milieu des forêts, il sera nécessaire de défricher pour les mettre en place. Ceci créera de nouvelles structures linéaires susceptibles d'inciter davantage de chauves-souris à chasser à proximité immédiate de l'éolienne et le risque de mortalité augmentera si le déboisement n'est pas assez large.

2.2.2 Impacts sur les oiseaux

La collision des oiseaux avec les pales est l'impact le plus couramment cité lorsque l'on évoque l'énergie éolienne (American Wind Wildlife Institute, 2016). Il s'agit, en effet, de l'impact le plus facile à constater ; pour autant, il n'est pas certain qu'il soit le plus préjudiciable à la bonne conservation des populations d'oiseaux. Le dérangement des espèces nicheuses en phase d'exploitation a probablement un impact plus néfaste sur les espèces les plus patrimoniales, en particulier celles à maturité lente et à faible productivité annuelle. L'effet cumulatif des parcs éoliens en termes de dérangement des oiseaux ou de surcoût énergétique dans leur cycle annuel a probablement souvent un impact plus marqué sur les populations que la mortalité directe de certains individus.

2.2.2.1 Dérangement

Attraction, répulsion, habituation

Dans certains cas, les impacts indirects par perte ou modification de l'habitat peuvent affecter les populations d'oiseaux au niveau de leur alimentation – par une modification du nombre ou de l'accessibilité des proies présentes par exemple (Lowther, 2000 ; Strickland *et al.*, 2000 ; Hoover *et al.*, 2001 ; Smallwood *et al.*, 2001) – et de la reproduction (Winder *et al.*, 2014), mais aussi le niveau des densités d'oiseaux (Leddy *et al.*, 1999 ; Pearce-Higgins *et al.*, 2009 ; Zeiler & Gruenschachner-Berger, 2009 ; Winder *et al.*, 2014 ; Miao *et al.*, 2019) et la structure de leur peuplement (Kerlinger, 2000). Certaines espèces, telles que les échassiers et les oiseaux aquatiques, seraient plus sensibles à ces perturbations indirectes que d'autres.



© David Allemard

Héron cendré *Ardea cinerea* espèce sensible au dérangement occasionné par la présence d'éoliennes à proximité en période de reproduction.

Sur certains sites, une diminution de la densité d'oiseaux nicheurs est observée à proximité des éoliennes (Leddy *et al.*, 1999 ; Pearce-Higgins *et al.*, 2009 ; Zeiler & Gruenschachner-Berger, 2009 ; Winder *et al.*, 2014).

La question de l'habituation des oiseaux aux éoliennes reste discutée, celle-ci étant établie par certains auteurs (Madsen & Boertmann, 2008), tandis que d'autres ne l'ont pas observée sur les espèces étudiées (Hötker *et al.*, 2005 ; Rydell *et al.*, 2012). Il est à noter que cette habituation se fait au prix d'un risque accru de collision avec les éoliennes.

Perte ou modification d'habitat

Une étude menée par la LPO Aude de 1998 à 2007 s'est attachée à définir l'impact des éoliennes, implantées à partir de 2001, sur le comportement d'un couple d'aigle royal, *Aquila chrysaetos*, notamment les modifications d'utilisation spatiale du territoire (Riols-Loyrette, 2015) (**figure 7**) :

« L'étude des grands rapaces doit être menée sur de grandes surfaces du fait de l'étendue de leurs territoires de chasse et nécessite de travailler sur le long terme. Des changements paraissant infimes peuvent avoir des conséquences importantes sur l'utilisation de l'espace des différents couples d'aigles et sur leur productivité. Dans le cas présent, on a observé un échec de la reproduction

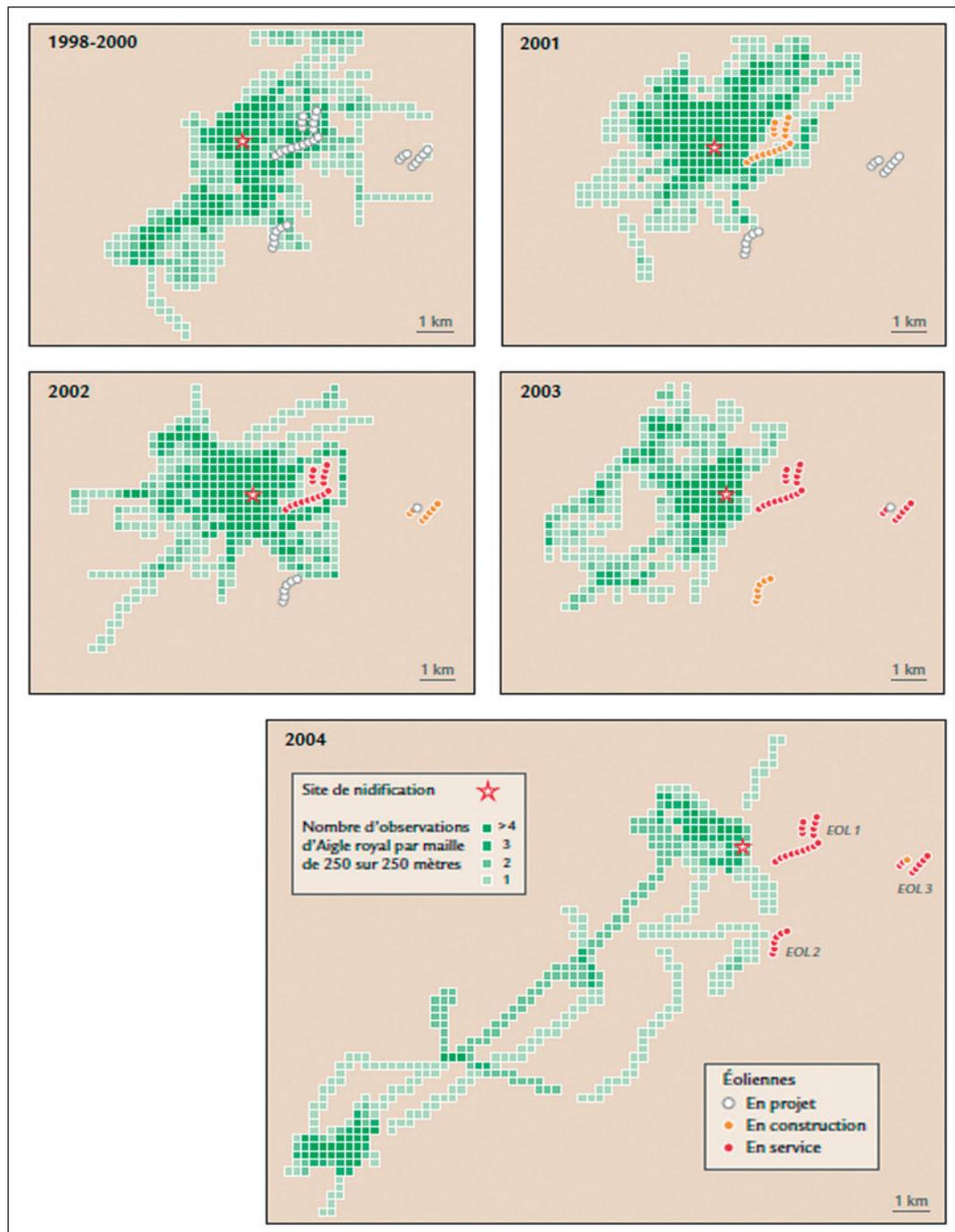
*« Nos résultats semblent également mettre en évidence [...] une nuisance d'ordre indirect, certaines espèces semblant avoir délaissé la zone, comme le suggèrent l'abandon total de la héronnière située à proximité d'une éolienne et la forte diminution du nombre de couples installés dans une autre située à 250 mètres du parc éolien » (Roux *et al.*, 2013).*

Au-delà de potentielles altérations ou destructions d'habitats en phase travaux, le dérangement en phase d'exploitation peut aboutir à un déplacement des oiseaux (Drewitt & Langston, 2006 ; Pearce-Higgins *et al.*, 2012 ; Riols-Loyrette, 2015).

L'implantation d'éoliennes peut altérer l'abondance ou la distribution de certaines espèces, ce qui peut poser des problèmes pour prévoir les impacts d'un projet en amont. Certaines espèces peuvent ainsi être attirées par les éoliennes ou leurs abords (notamment les rapaces), au moins lorsque certaines conditions sont réunies (météo, phénologie, etc.), tandis que d'autres peuvent être déplacées (espèces nicheuses). En outre, la réponse des espèces peut évoluer dans le temps en raison, par exemple, d'une accoutumance ou d'une augmentation de la disponibilité alimentaire à proximité des machines, comme cela a été suggéré pour les mammifères marins (Russell *et al.*, 2014).

En phase d'exploitation, certains oiseaux qui utilisent les alentours du parc comme reposoir peuvent montrer une réaction d'évitement (Hötker *et al.*, 2005 ; Devereux *et al.*, 2008 ; Steinborn *et al.*, 2011 ; Fijn *et al.*, 2012 ; Stevens *et al.*, 2013).

Figure 7 – Fréquentation de l’aire de l’étude (carrés de 250 m de côté) par l’aigle royal *Aquila chrysaetos* et localisation des éoliennes pour la période 1998-2000 (avant la construction du parc éolien) puis de 2001 à 2004 (d’après Riols-Loyrette, 2015)



à compter de la construction du premier parc éolien ainsi qu’une modification de la fréquentation du territoire, suivie du changement de site de reproduction les années suivantes. »

Sur la base du suivi télémétrique en 3D d’aigles royaux réalisé pendant près de 3 ans, Itty et Duriez (2018) ont pu mettre en évidence une perte de territoire similaire, de l’ordre de 450 ha, et montrer un risque de collision élevé, de l’ordre de 30 à 45 %, quelles que soient les conditions aérologiques.

Une étude similaire réalisée sur des milans royaux a également montré une perte d’habitat fonctionnel suite à l’implantation d’éoliennes au Portugal (Marques *et al.*, 2017).



© Fabrice Cahiez

Grues cendrées
Grus grus en vol :
l'effet barrière
sur ces migrateurs
est à prendre
en considération.

Effet « barrière »

Définir si le mouvement d'une éolienne provoque ou non une réaction chez un oiseau migrateur n'est pas aisé. Ce travail a toutefois été mené à l'échelle de cinq parcs en Champagne-Ardenne, notamment au regard de la problématique grue cendrée (Soufflot, 2010). Ce document évoque les limites de l'exercice, produit des analyses à partir des 163 587 migrateurs comptés et des différentes réactions observées, et énonce plusieurs recommandations de nature à réduire l'impact des futurs parcs sur les oiseaux de passage.

Il faut considérer les risques de collision et d'effarouchement comme les deux faces d'une même pièce. Les oiseaux qui ne montrent pas de réaction d'évitement par rapport aux éoliennes seront souvent plus sujets aux collisions que ceux qui sont effarouchés.

Les grues cendrées, par exemple, peuvent être considérées comme sensibles à l'effarouchement dans le sens où elles ont tendance à contourner les parcs (le plus souvent bien en amont et sans montrer de réaction vive). De fait, aucun cadavre de grue cendrée n'a, à ce jour, été répertorié en France (Marx, 2017) et seuls 25 cadavres ont été recensés en Europe (Dürr, 2019). Cependant, cette faible mortalité constatée résulte en partie du faible nombre d'éoliennes implantées jusqu'ici sur le couloir de migration ou à proximité des sites d'hivernage des grues cendrées et du faible nombre de rapports de suivis de mortalité disponibles. Le coût engendré par le contournement des parcs éoliens reste un domaine de recherche à explorer.

Les cygnes en migration semblent également sensibles à l'effet barrière puisqu'ils contournent les sites d'implantation (Moriguchi *et al.*, 2017).

L'impact de l'effet barrière sur les populations d'oiseaux migrateurs reste aujourd'hui difficile à évaluer et nécessiterait donc de plus amples travaux de recherche.

2.2.2.2 Collision

La mortalité des oiseaux peut résulter non seulement de collisions avec les pales, mais aussi avec la tour ou la nacelle lorsque la visibilité est limitée. Il est également possible que les petits passereaux subissent, comme les chauves-souris, des barotraumatismes ou qu'ils soient projetés au sol par les turbulences créées par la rotation des pales.

Le risque de collision est directement corrélé à l'activité aviaire. C'est pourquoi les oiseaux qui utilisent quotidiennement un site (par exemple comme zone de chasse ou comme lieu de passage obligé entre site de nourrissage et de repos) présentent un plus fort risque de collision que les oiseaux migrateurs confrontés au parc une à deux fois dans l'année (Hötcker *et al.*, 2005 ; Drewitt & Langston, 2006 ; Pearce-Higgins *et al.*, 2008 ; Krijgsveld *et al.*, 2009 ; Langgemach & Dürr, 2013).

L'analyse des suivis de mortalité effectués en France de 1997 à 2015 (Marx, 2017) donne une vision détaillée de la mortalité directe par collision des oiseaux avec les éoliennes.

Quantité

Le nombre de cas de collisions constatés est globalement faible au regard de l'effort de prospection mis en œuvre (35 903 prospections réalisées dans le cadre de suivis de mortalité, généralement sur un rayon théorique de 50 m autour des éoliennes, ont permis de découvrir 803 cadavres d'oiseaux, soit 1 cadavre toutes les 45 prospections). Le nombre de cadavres trouvés dépend essentiellement de cet effort de prospection³, des enjeux avifaunistiques présents sur le site, du taux de détection⁴ et de la durée moyenne de persistance des cadavres. Les suivis les plus robustes (au moins 48 semaines de prospections dans l'année à raison d'au moins une prospection par semaine sur un rayon théorique d'au moins 50 m sous chaque éolienne du parc) réalisés sur des parcs présentant des enjeux environnementaux a priori forts puisque situés à proximité de ZPS, ont permis de découvrir en moyenne 2,2 oiseaux par éolienne et par année de suivi.

La mortalité réelle due aux éoliennes n'est, quant à elle, estimée que pour très peu de parcs français, souvent localisés dans des ZPS ou présentant de fortes sensibilités avifaunistiques. Pour les huit parcs concernés, l'estimation de la mortalité réelle varie de 0,3 à 18,3 oiseaux tués par éolienne et par an, la médiane s'établissant à 4,5 et la moyenne à 7,0. Ces estimations rejoignent celles établies aux États-Unis (Loss *et al.*, 2013) ou au Canada (Canada Bird Studies, 2016). Certains parcs n'impactent donc qu'un faible nombre d'oiseaux, du moins en ce qui concerne la mortalité directe par collision.

Toutefois, à l'échelle d'un parc, même un faible taux de mortalité peut générer des incidences écologiques notables, en particulier pour les espèces menacées (au niveau local, régional, national, européen et mondial) et pour les espèces à maturité lente et à faible productivité annuelle (Carrete *et al.*, 2009 ; Dahl *et al.*, 2012 ; Balotari-Chiebao *et al.*, 2016 ; Duriez *et al.*, 2018).



© Philippe Massot/ONCFS

Cadavre d'alouette des champs *Alauda arvensis* au pied d'une éolienne vraisemblablement morte suite à une collision.

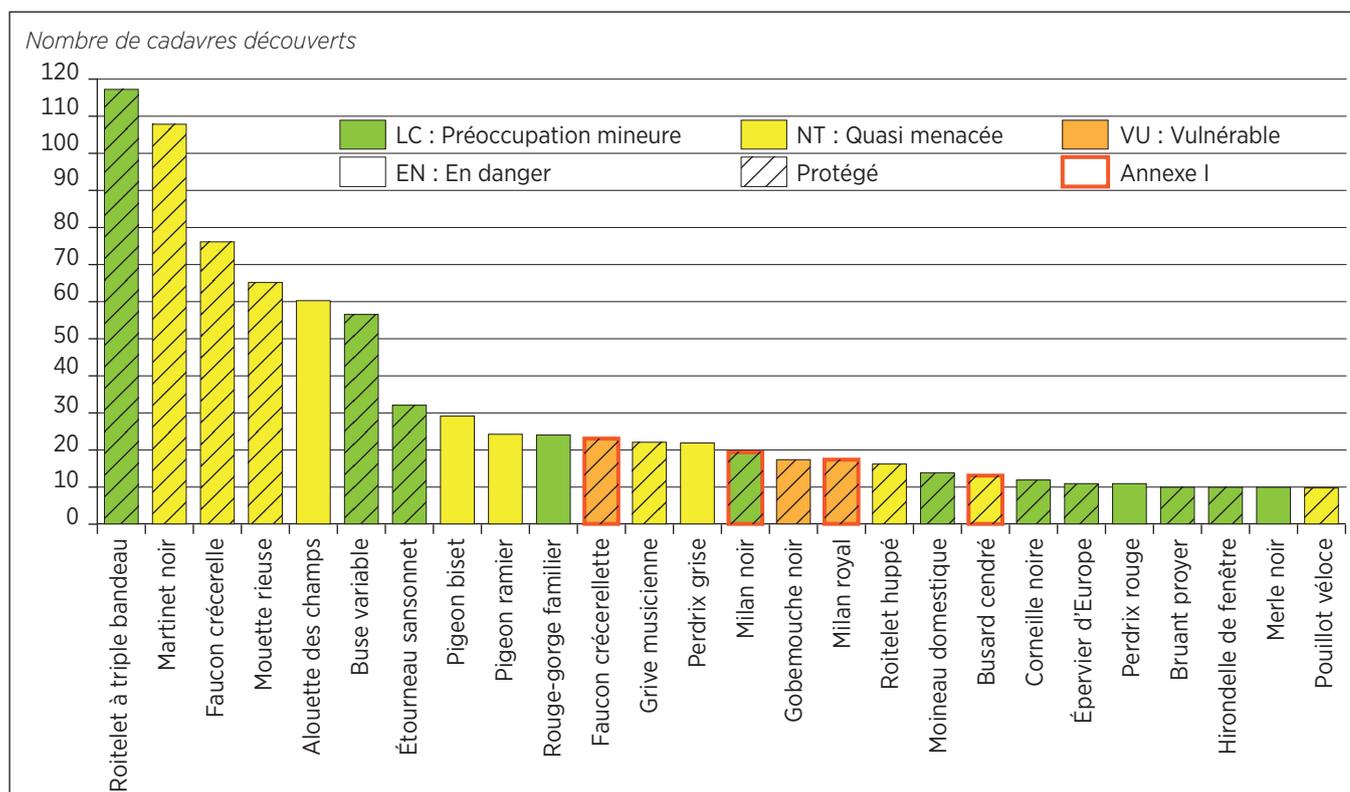
3. Fréquence des passages, surfaces prospectées, etc.

4. Le taux de détection reflète tout autant la difficulté à prospecter certains sites en fonction de la couverture végétale que l'efficacité de l'observateur.

Espèces

La majeure partie des espèces d'oiseaux présentes en France est protégée. Il est donc normal de retrouver une proportion importante d'espèces protégées sous les éoliennes françaises – 75 % selon Marx (2017) (**figure 8**). En outre, 10,2 % des carcasses retrouvées appartiennent à des espèces inscrites à l'annexe I, et 8,4 % figurent sur la liste rouge des espèces menacées en France (UICN France *et al.*, 2016).

Figure 8 – Principales espèces retrouvées sous les éoliennes françaises entre 1997 et 2015, statuts de protection et de conservation (Marx, 2017)



Les roitelets à triple bandeau et les martinets noirs, impactés principalement lors de la migration postnuptiale, sont les espèces les plus retrouvées en valeur absolue sous les éoliennes françaises. Les rapaces diurnes (faucon crécerelle, faucon crécerellette, milan noir, milan royal, busard cendré, buse variable, etc.) sont, par contre, indéniablement les espèces dont le taux de mortalité dû aux éoliennes est le plus élevé au regard de leurs effectifs (**figure 9**).

On notera également une très forte sensibilité des Laridés (mouettes et goélands) au risque de collision, notamment sur les parcs éoliens littoraux où leurs cadavres sont retrouvés en nombre important.

Le fait que certaines espèces n'aient pas été retrouvées sous les éoliennes françaises ne permet pas de conclure qu'elles seraient moins sensibles que d'autres à ce risque de collision. Bien d'autres raisons peuvent expliquer cette absence de mortalité constatée : préservation de leur espace vital et des voies de déplacement qu'elles empruntent, faibles effectifs, nombre encore réduit de suivis de mortalité disponibles. Des cas de mortalité de grues cendrées et de pygargues à queue blanche ont par exemple été recensés dans d'autres pays européens. Quant au gypaète barbu, le nombre extrêmement réduit de couples nicheurs en France rend toute découverte de cadavre improbable.



© Raphaël Bussière

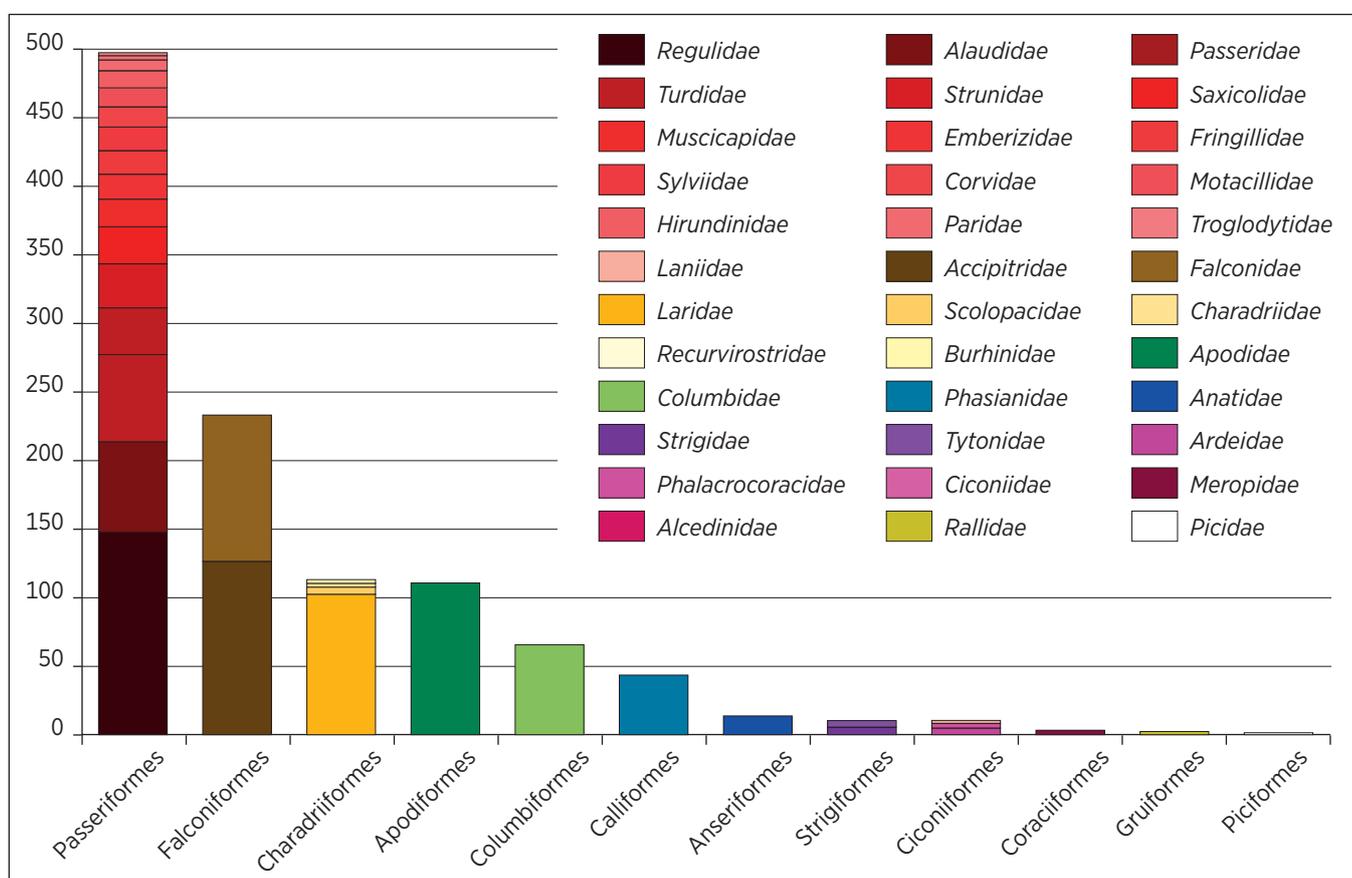
Roitelet à triple bandeau *Regulus ignicapilla* espèce fortement impactée.



© Denis Rouy/ONCFS

Cadavre d'un martinet noir *Apus apus* au pied d'une éolienne, vraisemblablement mort suite à une collision.

Figure 9 - Nombre et classification par ordre et par famille des oiseaux retrouvés sous les éoliennes françaises entre 1997 et 2015 (Marx, 2017)



Facteurs d'impact

Type d'habitat

Le type d'habitat au sens Corine Land Cover ne permet pas, à lui seul, d'expliquer la mortalité aviaire due aux éoliennes. En particulier, l'implantation en zone d'agriculture intensive n'est pas une condition suffisante pour éviter les collisions des oiseaux avec les éoliennes. Bien d'autres facteurs interviennent comme la proximité du littoral, d'espaces boisés, de zones humides ou tout simplement le fait que certaines espèces utilisent ces sites d'une façon ou d'une autre (nidification, chasse, déplacement, repos, etc.).

Zones de protection spéciale

La mortalité directe due aux éoliennes est au moins deux fois plus importante à proximité des zones de protection spéciale (ZPS). De plus, elle y affecte bien plus qu'ailleurs les espèces inscrites à l'annexe I de la directive Oiseaux mais également celles considérées comme menacées sur la liste rouge française des oiseaux de France métropolitaine (Marx, 2017). Il convient donc d'éviter d'implanter des éoliennes dans ces périmètres à forts enjeux avifaunistiques – c'est ce que font déjà 15 régions métropolitaines – ainsi que dans une zone tampon correspondant au rayon d'action des espèces ayant justifié ces classements en ZPS, d'autant plus lorsque celles-ci sont réputées sensibles à l'éolien (rapaces, planeurs, migrants).

Gabarit

Le développement de l'éolien en France s'est accompagné d'une augmentation du gabarit des machines (doublement de la hauteur totale entre 2000 et 2015), d'une évolution du type d'habitat accueillant les éoliennes (80 % d'espaces naturels avant 2004, 80 % de plaine agricole depuis 2006) et d'un éloignement progressif des ZPS. Il en résulte que les éoliennes les plus anciennes, et donc les plus petites, sont également celles pour lesquelles la mortalité constatée est la plus importante. Il est donc difficile de faire ressortir le facteur « gabarit » comme déterminant tant les spécificités de chaque site sont prédominantes.

Ce résultat rejoint les conclusions d'une étude aux États-Unis pour laquelle il existe des variations considérables dans les taux de mortalité des oiseaux et des chauves-souris entre les sites qui ne sont pas expliqués uniquement par la taille des turbines (Barclay *et al.*, 2007).

La hauteur du bas des pales est parfois évoquée comme facteur d'impact. Cette hypothèse est toutefois difficile à vérifier en France du fait d'une évolution particulière du gabarit des éoliennes. Jusqu'en 2006, c'est principalement l'augmentation de la hauteur des mâts qui a contribué à l'augmentation du gabarit des machines, il en a donc résulté une élévation du bas des pales. Depuis 2006, l'augmentation de la hauteur des mâts s'accompagne également d'un accroissement de la longueur des pales, ceci explique que la hauteur du bas des pales reste relativement stable depuis cette époque.



Ce générateur fait partie d'un parc éolien implanté en milieu mixte (forestier et agricole) au sud de la plaine de la Lorraine (Vosges).

© Philippe Massin/ONCFS

La vitesse de rotation du rotor a diminué au fur et à mesure que les pales s’allongeaient ; il en découle une vitesse linéaire en bout de pale relativement stable avec le temps sur l’ensemble du parc éolien français et une difficulté à faire ressortir ce facteur comme prédominant. À l’étranger, où les gabarits des éoliennes sont moins homogènes, certains auteurs recommandent de réduire la vitesse et d’avoir recours à des éoliennes plus grandes pour augmenter leur visibilité (Cook *et al.*, 2011 ; Dai *et al.*, 2015).

2.2.3 Impacts sur les chiroptères

2.2.3.1 Sensibilité des populations

De la même manière que l’avifaune, les chiroptères sont impactés par les éoliennes directement – par collision et barotraumatisme – et indirectement – par perte d’habitats. Toutefois, il semblerait que le nombre de chauves-souris tuées par éolienne et par an soit plus important que le nombre d’oiseaux (Marx, 2017) lorsqu’aucun plan de bridage des éoliennes n’est mis en œuvre.

De plus, et contrairement aux oiseaux, l’état des populations actuelles, leur démographie et donc l’impact de l’éolien sur celles-ci sont mal connus (Diffendorfer *et al.*, 2015 ; Lentini *et al.*, 2015). À cela s’ajoutent un taux de reproduction faible (un seul jeune par an pour la plupart des espèces), une maturité sexuelle relativement tardive (entre 1 et 3 ans suivant les espèces) et une longévité élevée (Austad & Fischer, 1991 ; Wilkinson & South, 2002 ; Turbill *et al.*, 2011). Trois caractéristiques qui expliquent la vulnérabilité naturelle des populations de chiroptères dont le maintien repose fortement sur les individus adultes et leur survie (Culina *et al.*, 2019).

Les espèces migratrices sont plus fécondes (deux petits par an) et plus rapidement matures sexuellement (à partir de l’âge d’un an) mais ce caractère est compensé par la forte mortalité induite par la migration longue distance.

Les tendances démographiques sont inconnues pour 19 des 34 espèces présentes en France métropolitaine (**tableau 1**). Certaines populations semblent être en augmentation ; néanmoins, les effectifs ne sont pas revenus au niveau de ceux des années 1950-1960, période à laquelle un effondrement des populations s’est produit (Tapiero, 2017).

Tableau 1 – Tendances évolutives des populations de chiroptères en France

(d’après Groupe Chiroptères de la SFEPM, 2016a ; Tapiero, 2017).

En gras, les espèces à risque élevé d’après Eurobats (Rodrigues *et al.*, 2015)

Espèces	Tendance	Espèces	Tendance	Espèces	Tendance
Barbastelle d’Europe	Augmentation	Murin de Daubenton	Inconnue	Pipistrelle commune	Diminution
Grand murin	Augmentation	Murin de Natterer	Inconnue	Pipistrelle de Kuhl	Augmentation
Grand rhinolophe	Augmentation	Murin des marais	Diminution	Pipistrelle de Nathusius	Inconnue
Grande noctule	Inconnue	Murin du Maghreb	Diminution	Pipistrelle pygmée	Inconnue
Minioptère de Schreibers	Diminution	Murin d’Escalera	Inconnue	Rhinolophe de Méhely	Inconnue
Molosse de Cestoni	Inconnue	Noctule commune	Inconnue	Rhinolophe euryale	Augmentation
Murin à moustaches	Inconnue	Noctule de Leisler	Diminution	Sérotine bicolore	Inconnue
Murin à oreilles échancrées	Augmentation	Oreillard gris	Inconnue	Sérotine commune	Diminution
Murin d’Alcathoe	Inconnue	Oreillard montagnard	Inconnue	Sérotine de Nilsson	Inconnue
Murin de Bechstein	Inconnue	Oreillard roux	Inconnue	Vespère de Savi	Inconnue
Murin de Brandt	Inconnue	Petit murin	Diminution		
Murin de Capaccini	Augmentation	Petit rhinolophe	Augmentation		

Plusieurs espèces sensibles à l'éolien, notamment la pipistrelle commune et les noctules que l'on retrouve en nombre lors des suivis de mortalité, ont des effectifs en diminution du fait des nombreuses pressions anthropiques qui pèsent déjà sur leurs populations, alors qu'une seule (pipistrelle de Kuhl) voit ses populations augmenter. À l'inverse, sur les huit espèces dont les effectifs croissent, six d'entre elles (des genres *Myotis* et *Rhinolophus*) sont considérées comme peu sensibles à l'éolien, car elles sont peu retrouvées au pied des éoliennes en Europe (Tapiero, 2017). Les pertes d'habitat engendrées par l'implantation des machines concernent quant à elles toutes les espèces, sensibles ou pas à la mortalité par collision ou barotraumatisme.

Il est cependant possible que les populations d'espèces sensibles à l'éolien ne se renouvelleront pas si elles sont soumises à une surmortalité causée par un développement des parcs éoliens non planifié et ne prenant pas suffisamment en compte les enjeux chiroptérologiques.

2.2.3.2 Dégradation des habitats

Pertes par destruction

L'implantation d'un parc impose la destruction du milieu présent pour installer les machines et aménager les voies d'accès. Les chiroptères ne sont pas impactés de la même façon selon les habitats modifiés. La perte d'une zone de culture céréalière est ainsi moins importante pour les chauves-souris que celle d'une forêt de feuillus ou mixte, car ce dernier milieu accueille beaucoup plus d'espèces que le premier.

Ainsi, les milieux forestiers (forêts de feuillus ou mixtes), les systèmes agricoles complexes (bocage) et les zones humides fournissent des sites de chasse ou des gîtes pour de nombreuses espèces de chiroptères grâce à la présence de vieux arbres (gîtes), de haies (corridors de déplacement) ou de plans d'eau (présence d'insectes) par exemple.

L'implantation d'un parc éolien en forêt est un cas particulier. En effet, le défrichage d'espaces boisés peut entraîner la destruction de sites de chasse ou de gîtes pour certaines espèces, mais aussi la création de milieux favorables que sont les clairières et lisières forestières (**photo 2, p. 31** et **photo 5**). Celles-ci constituent des voies de déplacement et des zones de chasse pour de nombreuses espèces (Kunz *et al.*, 2007b ; Horn *et al.*, 2008b).



Photo 5 – Défrichage pour l'établissement des voies d'accès d'un parc éolien. L'implantation d'un parc en forêt implique de gros travaux de défrichage et provoque donc l'ouverture du milieu, favorable à de nombreuses espèces de chiroptères.

© Guillaume Foit/Audace

Toutefois, ces milieux qui sont alors situés au pied ou à proximité des éoliennes constituent des facteurs pouvant augmenter les risques de collision entre les chauves-souris et les aérogénérateurs.

Pertes par aversion

Ce type d'impacts est avéré pour certaines espèces d'oiseaux, mais a longtemps été énoncé comme non démontré dans la littérature spécialisée pour les chiroptères et n'est donc pas toujours pris en compte par les développeurs (Groupe Chiroptères de la SFEPM, 2016a).

Le cas a toutefois déjà été étudié pour les éoliennes domestiques (hauteur inférieure à 20 m, diamètre des pales inférieur à 13 m) au Royaume-Uni, montrant que la présence d'une machine en fonctionnement réduit l'activité des chiroptères dans un rayon d'une vingtaine de mètres (Minderman *et al.*, 2012). La portée de cette perturbation peut être accrue lorsque plusieurs éoliennes sont proches les unes des autres (moins de 90 m entre chaque), jusqu'à atteindre les 100 m (Minderman *et al.*, 2017). Cet impact reste limité en superficie, bien qu'il doive être pris en considération quand les éoliennes sont installées à proximité d'habitats importants pour les chauves-souris, comme les haies et ripisylves par exemple (Minderman *et al.*, 2012).

Pour des éoliennes industrielles, l'étude de Millon *et al.* (2015) a permis de mettre en évidence une baisse de l'activité chiroptérologique autour d'un parc éolien, notamment entre mai et juillet, ce qui correspondrait à un comportement d'évitement exprimé par des populations locales habituées à la présence des machines. Au contraire, l'arrivée d'individus migrateurs non coutumiers de ces éoliennes est probablement à l'origine d'un effet d'aversion beaucoup moins important sur la période allant d'août à septembre (Millon *et al.*, 2015).

Des résultats similaires sont visibles dans la publication de Barré *et al.* (2018) où l'activité chiroptérologique le long des haies est fortement influencée par la distance aux éoliennes, pour tous les groupes étudiés.

Cette perte d'habitat par aversion a aussi été observée par Roeleke *et al.* (2016) chez la noctule commune.

2.2.3.3 Mortalité directe

Bien que les premiers cas constatés de mortalité de chauves-souris due à des éoliennes remontent à 1972 (Johnson *et al.*, 2003), il aura fallu attendre la fin du XX^e siècle pour que la communauté scientifique et les autorités gouvernementales et juridiques se penchent sur le problème.

Depuis, de nombreux rapports et études à travers le monde ont apporté des preuves attestant d'un phénomène encore plus fréquent que la mortalité aviaire : des cadavres de chiroptères sont retrouvés sur la grande majorité des parcs éoliens (Hein & Schirmacher, 2016 ; Zimmerling *et al.*, 2016 ; Frick *et al.*, 2017 ; Heitz *et al.*, 2017). Ceci s'explique en partie par une absence de prise en compte de ce taxon lors de la planification des premiers projets du fait de connaissances lacunaires sur les chauves-souris, ce qui a notamment conduit à placer des éoliennes sur des sites à enjeux.

Actuellement, la mortalité des chiroptères est un phénomène très étudié, mais les causes distales de cet événement sont moins connues que les causes directes. Les individus meurent après un barotraumatisme ou une collision avec une pale en mouvement, mais les raisons ultimes de ces accidents sont encore discutées : les collisions sont-elles aléatoires ? Les chauves-souris sont-elles attirées vers les éoliennes (voir p. 47, Phénomène d'attraction – Cryan & Barclay, 2009) ?

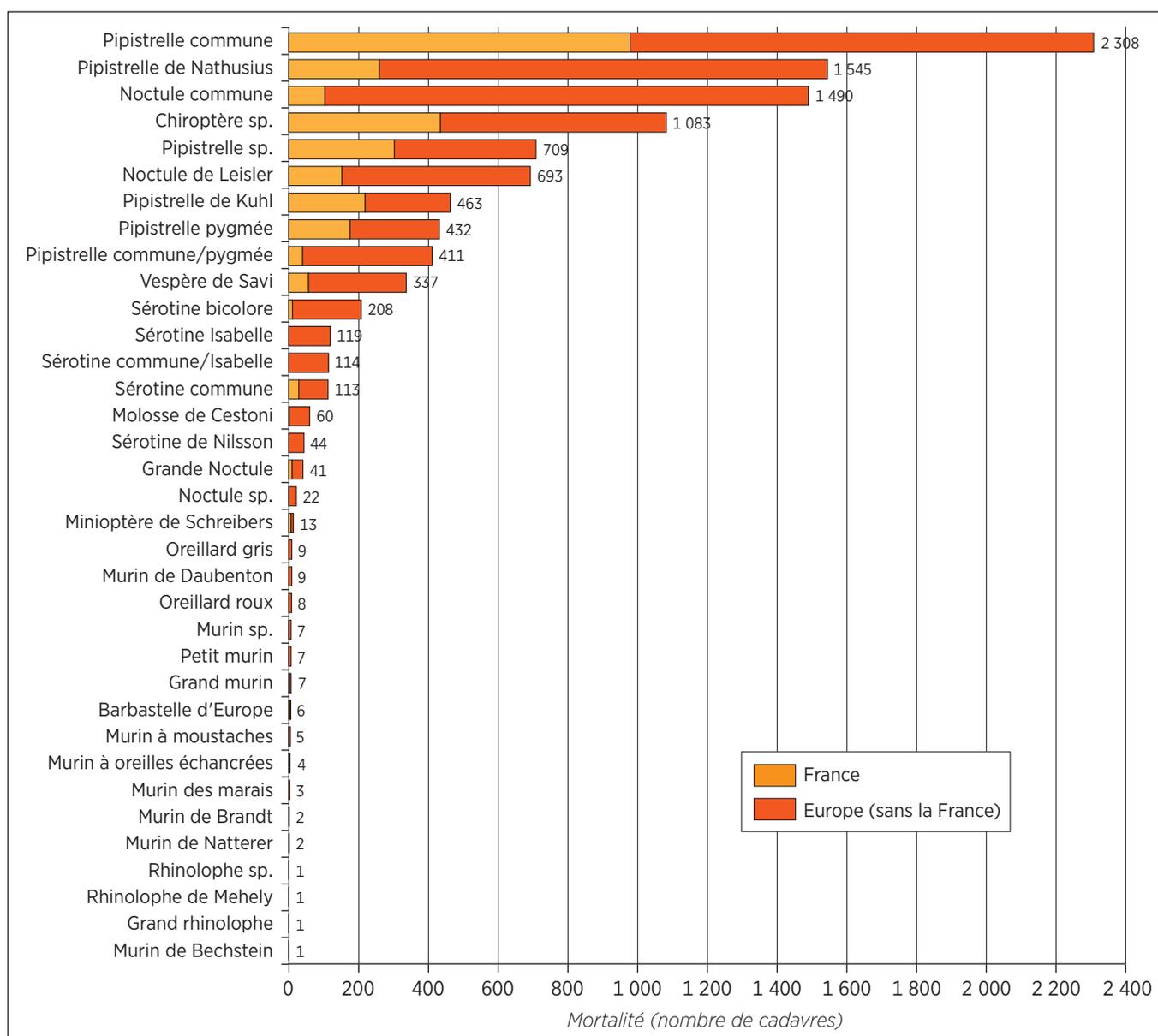
Bien que la question du « pourquoi » ces animaux entrent en collision avec les éoliennes ne soit pas encore totalement réglée, les suivis de la mortalité et de l'activité autour des éoliennes ont permis de mettre en évidence plusieurs facteurs de risques.

D'un côté, les conditions météorologiques (vitesse du vent, température, etc.) et certains cycles temporels (saisons, heure) affectent grandement l'activité chiroptérologique (voir p. 80, Pour les chiroptères). De l'autre, plusieurs caractéristiques écologiques, comme les mœurs migratoires ou le comportement de chasse, influent sur le risque de collision au niveau du genre voire de l'espèce (Silva, 2009).

Les bilans chiffrés de la mortalité éolienne mettent en évidence cette différence de sensibilité selon les espèces ou genres (**figure 10**).

Murins et rhinolophes sont ainsi beaucoup moins dénombrés au pied des éoliennes que les pipistrelles ou les noctules. Certaines espèces comme le petit rhinolophe ou l'oreillard montagnard n'ont jamais été retrouvées au pied des éoliennes, mais cela ne veut pas dire pour autant que des individus n'aient jamais été tués par une pale.

Figure 10 – Nombre de cadavres de chiroptères recensés au pied des éoliennes en Europe entre 2003 et 2016
(d'après Dürr, 2019).



La sensibilité des espèces est définie par leur écologie, comme évoqué plus haut : chasse, migration et gîte sont les paramètres les plus importants. La pipistrelle commune est une espèce ubiquiste en termes de régime alimentaire et d'habitat, et possède les plus fortes populations en Europe, ce qui explique sa place en tête des comptages de cadavre.

Le premier paramètre permet ainsi de séparer grossièrement les chiroptères en trois groupes : les espèces qui chassent des proies posées sur le substrat (sol, végétation), celles qui chassent des proies volant à proximité du substrat et celles qui chassent des proies en plein ciel (Denzinger & Schnitzler, 2013). Ce sont ces dernières qui encourent le plus grand risque de collision avec les éoliennes : ces individus prospectent en plein ciel, souvent à hauteur de pales, comme observé par Foo *et al.* (2017) ou Horn *et al.* (2008b). En Europe, les noctules et le vespère de Savi sont de parfaits exemples de chasseurs de haut vol.

Les mœurs migratoires de certaines espèces, comme les noctules ainsi que les pipistrelles de Nathusius et pygmée, les mettent aussi en danger. Les victimes de collision en Amérique du Nord sont presque exclusivement des migratrices ; et même si la part d'individus locaux semble plus importante dans les comptages en Europe, les chauves-souris effectuant des migrations longues – et à haute altitude – sont les premières impactées (Bach & Rahmel, 2004). Ceci explique le pic de mortalité relevé sur de nombreux parcs en août et septembre et qui correspond à la migration automnale des individus.

Les causes précises de cette sensibilité plus importante des chauves-souris migratrices ne sont pas connues, mais l'hypothèse selon laquelle ces individus utilisent moins l'écholocation lors de leurs déplacements paraît sérieuse (Ahlén, 2003 ; Bach & Rahmel, 2004 ; Cryan & Brown, 2007). Les animaux en transit long semblent se reposer sur leur vue car ils volent à haute altitude, au-dessus de la plupart des obstacles. Il paraît vraisemblable qu'ils perçoivent au moins les mâts des éoliennes, notamment car aucune collision avec une machine à l'arrêt n'a jamais été enregistrée ; mais sont-ils capables de voir les pales en rotation (Dürr & Bach, 2004) ? Comme pour les oiseaux, le flou de vitesse empêche peut-être les chauves-souris de visualiser le rotor en mouvement (Hodos, 2001 et 2003). Dürr & Bach (2004) proposent que les individus sous-estiment la vitesse de rotation, ou ne perçoivent pas la prochaine pale arrivant par en haut ou en bas.

Les espèces préférant les arbres pour leur gîte sont elles aussi plus sensibles. Toutefois, ce critère semble moins influencer le risque de collision que la technique de chasse ou le caractère migrateur de l'espèce. En effet, l'oreillard roux ou certains murins sont considérés comme arboricoles mais sont peu retrouvés au pied des éoliennes, alors que d'autres espèces comme la pipistrelle de Nathusius (**photo 6**) et la grande noctule, arboricoles mais aussi chasseuses de haut vol, sont beaucoup plus impactées.



Photo 6 – Pipistrelle de Nathusius *Pipistrellus nathusii* en vol. Cette espèce, migratrice et arboricole, est considérée comme très sensible à l'éolien.

Ces caractéristiques influencent donc le risque de collision, notamment car les éoliennes provoquent un effet d'attraction plus ou moins fort sur les chiroptères selon leur écologie (voir p. 47, Phénomène d'attraction). Toutefois, l'évènement peut aussi arriver de façon fortuite : une espèce migratrice ou chasseuse en plein ciel a plus de chance qu'une espèce sédentaire et glaneuse d'être frappée par une pale, même si l'effet d'attraction est exclu (Cryan & Barclay, 2009). Au final, ce dernier amplifie un risque déjà présent mais variable selon les espèces.

En plus des paramètres environnementaux et écologiques affectant le risque de collision, un autre phénomène vient augmenter les probabilités d'accident : la déformation des signaux acoustiques renvoyés par les pales en mouvement.

En effet, il a été montré que la rotation des pales des éoliennes provoque des changements de fréquence et d'intensité des ultrasons produits par les chauves-souris (Long *et al.*, 2009 et 2010). Par conséquent, l'écho renvoyé est difficilement interprétable.

L'émission d'un très grand nombre de signaux – plus de 50 – depuis le même angle serait nécessaire pour que l'individu assimile correctement le mouvement des pales. Mais cela semble impossible au vu du comportement de vol d'une chauve-souris (Long *et al.*, 2010).

Cette impossibilité de détecter les pales en mouvement, couplée à cette attractivité des éoliennes, constitue un piège efficace et mortel pour les chiroptères. Même si ce phénomène n'a été étudié qu'avec des machines de petit gabarit, il paraît vraisemblable qu'il soit similaire voire plus important avec des rotors de plus grande taille (Long *et al.*, 2009 et 2010).

Un barotraumatisme ou une collision directe entre une chauve-souris et une pale d'éolienne se conclut presque systématiquement par la mort de l'individu. Toutefois, la mort n'est pas toujours immédiate : la chauve-souris peut survivre au choc initial, mais les blessures subies – une aile cassée, une hémorragie interne – l'handicaperont lors de la chasse ou d'un vol prolongé (migration) et conduiront en général à une mort ultérieure (Grotsky *et al.*, 2011).



Cadavre de pipistrelle commune *Pipistrellus pipistrellus* retrouvé au pied d'une éolienne (Parc éolien de Bollène – 84). La déchirure visible au niveau du patagium de l'aile droite de cette chauve-souris suggère une collision probable avec une pale.

© Denis Roux/ONCFS

Barotraumatismes

Les collisions ne sont pas les seules causes de mortalité provoquée par les éoliennes : certaines chauves-souris sont victimes de barotraumatisme, c'est-à-dire un choc lié à une diminution soudaine de la pression dans le corps, ici causé par le passage de l'individu à proximité d'une pale d'éolienne en mouvement (Baerwald *et al.*, 2008 ; Cryan & Barclay, 2009). Par conséquent, cette diminution brusque de la pression extérieure provoque une augmentation du volume des gaz (ici l'air contenu dans les poumons de l'individu) qui va repousser les tissus et aller jusqu'à causer un éclatement des alvéoles, voire des poumons, et par conséquent engendrer la mort de l'individu (Baerwald *et al.*, 2008).

Cette sensibilité particulière des chiroptères est due à leur anatomie, notamment à la constitution de leurs poumons, particulièrement grands et souples et donc susceptibles de s'élargir devant une chute rapide de pression, ainsi qu'à une membrane alvéolo-capillaire (lieu d'échange entre air et sang dans les poumons) particulièrement fine (Maina & King, 1984 ; Baerwald *et al.*, 2008).

Le barotraumatisme ne cause pas nécessairement une mort immédiate pour l'individu touché. Si la différence de pression est faible, celui-ci peut alors souffrir d'hémorragies internes durant plusieurs heures voire plusieurs jours avant de mourir (Grotsky *et al.*, 2011 ; Rollins *et al.*, 2012 ; U.S. Fish and Wildlife Service, 2012).

Cette mort retardée est un frein, à la fois pour déterminer la proportion de morts par barotraumatisme parmi toutes celles imputées aux éoliennes, et tout simplement pour chiffrer la mortalité éolienne puisque les cadavres des chauves-souris atteintes de barotraumatisme qui meurent loin des aérogénérateurs ne sont pas retrouvés, et donc non comptabilisés (Grotsky *et al.*, 2011 ; U.S. Fish and Wildlife Service, 2012 ; Voigt *et al.*, 2015).

De plus, les symptômes d'un barotraumatisme que sont les hémorragies et œdèmes pulmonaires peuvent être causés par d'autres événements comme des chocs directs (avec une pale par exemple), le gel ou simplement la décomposition *post-mortem* du corps (Grotsky *et al.*, 2011 ; Rollins *et al.*, 2012). Leur présence sur un cadavre de chauve-souris n'est donc pas obligatoirement synonyme d'une mort par barotraumatisme. De la même façon, détecter une mort par barotraumatisme peut être complexe au vu des nombreux autres diagnostics possibles basés sur la présence d'une hémorragie ou d'un œdème pulmonaire (Grotsky *et al.*, 2011 ; Rollins *et al.*, 2012).

Dans tous les cas, des examens approfondis, notamment histologiques et radiologiques, sont indispensables pour déterminer une cause probable de mortalité. Une simple observation sur le terrain ne suffit pas toujours, car même une fracture n'apparaît pas systématiquement à l'œil nu (Grotsky *et al.*, 2011 ; Rollins *et al.*, 2012).

Phénomène d'attraction

Trois hypothèses ont été émises pour expliquer les collisions des chauves-souris avec les pales des éoliennes :

- il s'agit d'un événement aléatoire ;
- il s'agit d'une coïncidence : lors de certaines périodes de l'année, les chauves-souris peuvent présenter des comportements augmentant leur risque de collision avec une éolienne, comme la migration (Cryan & Barclay, 2009) ;
- il s'agit d'un événement non aléatoire : les chauves-souris, d'un naturel curieux, sont attirées par les éoliennes.

Depuis plusieurs années, c'est cette dernière hypothèse qui a été retenue, même si les causes précises de cette attraction restent floues. En effet, plusieurs sous-hypothèses ont été lancées pour tenter d'expliquer cette attraction :

- les mâts sont perçus comme des arbres géants, et par conséquent peuvent être assimilés à :
 - des gîtes potentiels pour les espèces arboricoles (Dürr & Bach, 2004 ; Arnett, 2005 ; Kunz *et al.*, 2007) ;
 - des sites de repos (Ahlén, 2003 ; Arnett, 2005), de *swarming*⁵ et de reproduction (Cryan & Brown, 2007 ; Horn *et al.*, 2008b) pour les espèces migratrices ;
 - des zones de chasse car les insectes y sont nombreux (Ahlén, 2003 ; Arnett, 2005 ; Kunz *et al.*, 2007 ; Horn *et al.*, 2008b, Rydell *et al.*, 2016) ;
- les éoliennes produisent :
 - des sons et ultrasons qui attirent les individus (Ahlén, 2003 ; Bach & Rahmel, 2004 ; Arnett, 2005 ; Kunz *et al.*, 2007 ; Horn *et al.*, 2008b) ;
 - un champ électromagnétique désorientant les chauves-souris (Kunz *et al.*, 2007) ;
- les éoliennes peuvent être la source d'écoulements d'eau, depuis les pales ou la nacelle (Roche *et al.*, 2018).

D'autres facteurs peuvent amplifier ce phénomène, notamment la météorologie qui est connue comme influençant grandement l'activité des chiroptères, mais aussi certains éléments paysagers comme les lisières et clairières créées pour l'implantation de machines en forêt (Dürr & Bach, 2004 ; Arnett, 2005 ; Kunz *et al.*, 2007 ; Horn *et al.*, 2008b). Le phénomène pourrait être autrement plus important pour les espèces migratrices en quête d'un site pour s'arrêter, se reposer et se nourrir, et encore plus si ces espèces sont arboricoles, comme la pipistrelle de Nathusius (Arnett, 2005 ; Kunz *et al.*, 2007 ; Horn *et al.*, 2008b).

Les postulats basés sur « l'éolienne perçue comme un arbre géant » ont montré leur validité, notamment avec les espèces migratrices arboricoles (ex : pipistrelle de Nathusius). En effet, la période charnière entre la fin de l'été et le début de l'automne, qui correspond à leurs mouvements migratoires automnaux, est aussi celle de leur reproduction. Les individus sont donc à ce moment en recherche de sites pour se rassembler et se reproduire (phénomène du *swarming*), mais où ils peuvent aussi se reposer et se nourrir (Arnett, 2005 ; Kunz *et al.*, 2007 ; Arnett *et al.*, 2008 ; Horn *et al.*, 2008b). Les éoliennes « arbres géants », qui constituent un repère dans le paysage, sont donc des lieux où les chauves-souris espèrent trouver le gîte et le couvert, mais aussi de la compagnie (Kunz *et al.*, 2007b ; Arnett *et al.*, 2008 ; Horn *et al.*, 2008b). Elles inspectent autant les machines à l'arrêt que celles en fonctionnement (Horn *et al.*, 2008b).

L'utilisation de l'imagerie thermique a ainsi permis d'observer des individus d'espèces migratrices arboricoles montrant un comportement d'inspection des éoliennes similaire à celui exprimé lors de l'inspection d'arbres lors de la recherche d'un gîte ; des tentatives d'atterrissage ont même pu être enregistrées (Arnett, 2005 ; Horn *et al.*, 2008b).

De la même manière, de nombreux individus en chasse active ont pu être aperçus autour d'aérogénérateurs (Horn *et al.*, 2008b). L'analyse des contenus stomacaux a aussi permis de mettre en évidence une correspondance avec les insectes présents à la surface des mâts ou dans l'atmosphère autour des éoliennes (Rydell *et al.*, 2016 ; Foo *et al.*, 2017).

5. Le *swarming* est un comportement observé chez les chauves-souris qui consiste en un regroupement de nombreux individus – parfois des centaines – appartenant à une seule ou plusieurs espèces. Cette concentration nocturne de chiroptères prend place à l'automne sur des sites différents des gîtes habituels de parturition ou d'hibernation. Lieux de reproduction et d'échanges sociaux, ils permettent le brassage génétique entre individus de nombreuses populations, et sont donc d'une grande importance pour la conservation des chiroptères.

L'identification des proies des chiroptères a démontré que des espèces chasseuses en vol se nourrissent aussi d'insectes posés sur les éoliennes ou en vol à proximité (après avoir été dérangés par les chauves-souris), qui ne constituent pas leur régime habituel, mais dont l'abondance est une manne alimentaire importante (Rydell *et al.*, 2016 ; Foo *et al.*, 2017). Les chiroptères semblent opportunistes dès lors qu'il s'agit de nourriture et n'hésitent pas un seul instant à exploiter une ressource alimentaire facile, qu'il s'agisse d'insectes nocturnes actifs autour des éoliennes ou d'espèces diurnes se reposant sur les machines (Dürr & Bach, 2004 ; Arnett, 2005 ; Kunz *et al.*, 2007 ; Arnett *et al.*, 2008 ; Horn *et al.*, 2008b ; Rydell *et al.*, 2010b ; Valdez & Cryan, 2013 ; Cryan *et al.*, 2014 ; Rydell *et al.*, 2016 ; Foo *et al.*, 2017).

La présence des insectes en elle-même est régie par de nombreux facteurs, comme la météo, la saison ou les habitats, mais aussi les caractéristiques des éoliennes comme leur couleur et leur température (Arnett, 2005 ; Horn *et al.*, 2008b). Ainsi, le blanc et le gris clair, couleurs utilisées pour la quasi-totalité des machines dans le monde (et les seules autorisées en France), sont aussi celles qui attirent le plus les insectes (Long *et al.*, 2011). Ceux-ci se concentrent aussi autour des machines à cause de la chaleur qu'elles dégagent, réchauffant l'air environnant (Dürr & Bach, 2004).

La création d'allées, lisières et clairières lors de l'implantation d'éoliennes en forêt est ainsi un bon exemple d'habitats favorisant la présence d'insectes – et de chauves-souris. Sur une zone vallonnée ou montagneuse, des conditions climatiques particulières, comme le passage d'une tempête ou la formation de brouillard, peuvent faire remonter de l'air chaud jusqu'au sommet des crêtes, attirant ainsi insectes et chiroptères ; la présence d'éoliennes à ces endroits présente donc des risques (Arnett, 2005 ; Kunz *et al.*, 2007 ; Arnett *et al.*, 2008).

En définitive, aucune des théories ne s'est imposée comme unique explication à l'attraction des chiroptères pour les éoliennes : il s'agirait plutôt d'une combinaison de plusieurs possibilités. Les chauves-souris s'attendent à trouver un gîte, d'autres congénères ou de la nourriture quand elles s'approchent des éoliennes (Cryan *et al.*, 2014).

Certaines hypothèses ont toutefois été reléguées au rang de cause mineure d'attraction, comme l'émission de sons et ultrasons par les machines (Ahlén, 2003 ; Bach & Rahmel, 2004). L'éclairage des machines (obligatoire ou non), a été écarté car il a été prouvé que les éoliennes éclairées n'attiraient pas plus les chauves-souris que les éoliennes non éclairées (Arnett *et al.*, 2008).

Une des principales difficultés pour confirmer ou non ces hypothèses est l'impossibilité, à l'heure actuelle, de différencier les individus locaux de ceux en migration (Arnett, 2005).

Bien que les deux puissent paraître incompatibles, il existerait donc un phénomène d'aversion à l'échelle du parc éolien, et un phénomène d'attraction à l'échelle de l'éolienne : les chauves-souris des populations locales – habituées aux éoliennes – les éviteraient, les migratrices – non habituées – s'en rapprocheraient (Millon *et al.*, 2015).

Atténuation des impacts sur la biodiversité



3.1 Pré-diagnostic : recherche de l'emplacement du site

Le choix de l'emplacement du parc (*macro-siting*) est la première et la plus importante des étapes du projet, étape qui, si elle est bien conduite, permet d'éviter la majorité des impacts potentiels des éoliennes sur la biodiversité (Ledant, 2006 ; Jones *et al.*, 2009 ; Kiesecker *et al.*, 2011 ; Gartman *et al.*, 2016a ; MEEM, 2016).

C'est lors de cette phase que des outils tels que le schéma régional éolien (SRE), en France, ou les cartes de sensibilité des espèces se révèlent indispensables, puisqu'ils permettent de situer les principales zones à enjeux et de faciliter la démarche pour les développeurs.

La recherche d'un site doit d'abord se concentrer sur des espaces à enjeux nuls ou faibles, distants de toute zone sensible, qui sont les plus favorables pour un parc éolien selon des critères économiques (puissance du vent), techniques (absence de servitude), environnementaux (zones éloignées d'espaces naturels protégés ou de sites d'importance pour des espèces sensibles), etc. (Kiesecker *et al.*, 2011 ; Gartman *et al.*, 2016a ; MEEM, 2016).

3.1.1 Documents guides

Le moyen le plus simple et le plus efficace pour éviter ou réduire les impacts d'un parc éolien sur l'environnement est de choisir un site présentant de faibles enjeux liés à la biodiversité. Bien que cette décision appartienne au développeur du projet, elle est guidée par des outils, réglementaires ou non.

En France, la principale aide à la décision est le SRE qui est non prescriptif, c'est-à-dire qu'il n'est pas obligatoire de s'y conformer, mais il ne doit pas non plus être ignoré (MEEM, 2016).

Actuellement, et avec la loi NOTRe (loi n° 2015-991 du 7 août 2015 portant nouvelle organisation territoriale de la République), aucune nouvelle région administrative n'a de SRE valide, la plupart ayant été annulés par la justice entre 2012 et 2016.

De plus, cette loi prévoit le remplacement d'ici mi-2019 du SRCAE – auquel est rattaché le SRE – par le SRADDET, excepté pour l'Île-de-France et la Corse (MEEM, 2016).

Bien que sur le fond, le SRADDET doit comporter des objectifs « portant sur le développement des énergies renouvelables et des énergies de récupération, notamment celui de l'énergie éolienne et de l'énergie biomasse, le cas échéant par zones géographiques » (art. R.4251-5 du Code général des collectivités territoriales), sur la forme, les SRE sont amenés à disparaître (MEEM, 2016).

Le principe du SRE, celui de mettre en évidence les zones les plus favorables à l'éolien et celles qu'il convient de préserver de l'implantation d'éoliennes, tout en prenant en compte un certain nombre de contraintes techniques, paysagères, patrimoniales et environnementales, est toutefois une bonne disposition, et devrait réapparaître d'une manière ou d'une autre au sein des SRADDET.

Cette nouvelle mouture des SRE devra néanmoins régler un des problèmes majeurs des versions actuelles – en plus de leur vulnérabilité face aux attaques en justice : l'hétérogénéité visible entre les différentes régions.

Il s'agit notamment de la nomenclature, dans laquelle les critères d'enjeux (nuls, faibles, modérés, forts ou très forts) ne sont pas tous présents pour toutes les régions. D'autres difficultés existent, comme des différences de classification de certaines aires naturelles

protégées en fonction du SRE (région PACA, 2012 ; région Rhône-Alpes, 2012 ; région Languedoc-Roussillon, 2013).

En plus de ne pas faciliter la tâche des utilisateurs de ces SRE, ces différences pourraient être préjudiciables pour les régions tant en termes de développement éolien qu'en termes de préservation de la biodiversité.

Un certain cadrage national est donc indispensable pour les futurs remplaçants de ces SRE, afin de garantir une homogénéité facilitant autant les démarches des développeurs qui œuvrent dans plusieurs régions que celles des autorités environnementales.

3.1.2 **Compatibilité avec la réglementation des aires naturelles**

En attendant le remplaçant du SRE, il existe une réglementation définie au niveau national : le Code de l'environnement, qui exclut *de facto* certaines zones d'une potentielle implantation d'éoliennes, ou permet celle-ci sous certaines conditions (MEEM, 2016).

La France compte de nombreuses aires, zones ou espaces dits naturels et protégés, dont les noms sont aussi diversifiés que leur objectif et leur réglementation, et qui, globalement, sont là pour protéger des éléments de biodiversité, que ce soient des espèces végétales ou animales, des habitats ou même des paysages. Il peut aussi s'agir de périmètres plus théoriques comme le domaine vital d'un rapace.

Les emplacements des aires naturelles protégées étant connus et définis, il est facile d'en établir une cartographie. La tâche s'avère plus complexe quand cela concerne les voies de migration (oiseaux et chauves-souris), les domaines vitaux (rapaces), les gîtes (chauves-souris), etc.

Pour obtenir ces informations, de nombreuses études ont été menées, apportant des nouvelles données, méthodes ou outils de planification à destination des développeurs, mais aussi des autorités chargées de l'élaboration du SRE et de son futur équivalent (Bright *et al.*, 2006 ; Bright *et al.*, 2008 ; Smallwood & Karas, 2009 ; Santos *et al.*, 2010 ; Obermeyer *et al.*, 2011 ; Schaub, 2012 ; Weller & Baldwin, 2012 ; Aschwanden *et al.*, 2013 ; Liechti *et al.*, 2013 ; Roscioni *et al.*, 2013 ; Santos *et al.*, 2013 ; Bradbury *et al.*, 2014 ; Felber & Stoeglehner, 2014 ; Hipkiss *et al.*, 2014 ; Ferreira *et al.*, 2015 ; Turvey & Taylor, 2015 ; Bay *et al.*, 2016 ; Groupe Chiroptères de la SFEPM, 2016b ; Jangid *et al.*, 2016 ; Silva *et al.*, 2017).

Ainsi, de nombreuses zones et sites à éviter ou à prendre en compte ont été identifiés.

3.1.2.1 **Zonage excluant l'implantation d'éoliennes**

La zone cœur (zone de protection) des parcs nationaux (PN) possède un statut de protection réglementaire qui interdit de fait l'installation d'éoliennes dans son périmètre (MEEM, 2016).

Selon l'article L. 332-1 et suivants du Code de l'environnement, les réserves naturelles régionales (RNR) et nationales (RNN) ne peuvent pas accueillir de parcs éoliens, leur but étant de protéger des éléments de biodiversité d'une importance particulière. La dégradation des milieux et la perturbation de la flore et de la faune y étant interdites, les éoliennes sont donc exclues (MEEM, 2016).

Ce type de projet est aussi interdit pour les milieux faisant l'objet d'un arrêté préfectoral de protection de biotope (APPB) ou arrêté de protection de biotope (APB), destiné à préserver les habitats accueillant des espèces faunistiques et floristiques menacées, comme défini dans les articles L. 411-1 à 3, et R. 411-15 à 17 du Code de l'environnement (MEEM, 2016).

À ces zonages se rajoutent les réserves biologiques intégrales (RBI ; ONF, 1998) où toute activité humaine est interdite, et les réserves biologiques dirigées (RBD ; ONF, 1995) où certaines activités de conservation ou de restauration sont possibles. Dans les deux cas, l'implantation d'éoliennes est interdite dans ces réserves dédiées à la conservation d'espèces ou milieux d'intérêt et menacés.

Le classement de boisement en forêt de protection (MAAPRAT, 2012) n'autorise aucun changement d'affectation des sols ou de mode d'occupation des sols, aucun défrichement, aucune fouille, aucune extraction de matériaux, aucune emprise d'infrastructure publique ou privée, aucun exhaussement du sol ou dépôt. Même si ce classement n'est pas fait selon des raisons écologiques pour toutes les forêts de protection, sa réglementation interdit *de facto* l'installation d'éoliennes.

De la même façon, les changements d'affectation ou les modes d'occupation du sol de nature à compromettre la conservation, la protection ou la création des boisements, ainsi que les défrichements et abattages d'arbres étant interdits en espace boisé classé, l'implantation d'éolienne n'est pas autorisée (MLETR, 2015a).

En vertu de la loi Littoral, un parc éolien ne peut être implanté dans une bande d'un kilomètre à compter de la limite haute du rivage ou des plus hautes eaux pour les plans d'eau intérieurs, ceci afin de respecter à la fois le principe de continuité de l'urbanisation (MLETR, 2015b) et la distance minimale aux habitations, qui est de 500 mètres (MEEM, 2017).

En dehors des espaces proches du rivage et au-delà de cette bande d'un kilomètre à compter de la limite haute du rivage ou des plus hautes eaux, les éoliennes ne sont plus soumises à l'article L. 121-8 et peuvent être implantées si elles ne portent pas atteinte à l'environnement ou aux sites et paysages remarquables et après « délibération favorable de l'organe délibérant de l'établissement public de coopération intercommunale compétent en matière de plan local d'urbanisme ou, à défaut, du conseil municipal de la commune concernée par l'ouvrage, et après avis de la commission départementale de la nature, des paysages et des sites » (MLETR, 2015c).

Les espaces appartenant au Conservatoire du littoral ne sont pas concernés par les projets de parc éolien car ceux-ci vont à l'encontre des objectifs du Conservatoire, c'est-à-dire « la sauvegarde de l'espace littoral et le maintien des sites naturels et de l'équilibre écologique, par l'acquisition de sites fragiles et menacés, en vue de leur protection définitive » (Conservatoire du littoral, 2017).

3.1.2.2 Zonage n'excluant pas l'éolien *a priori*

Il existe de nombreux autres zonages, enjeux et contraintes qui n'excluent pas réglementairement l'implantation d'éoliennes. Toutefois, ils réclament d'être pris en compte dans les projets de parcs éoliens car ceux-ci peuvent avoir un impact sur le site concerné. Les propriétaires ou gestionnaires de ces zones peuvent avoir à donner un avis conforme ou consultatif sur l'implantation d'éoliennes sur leur territoire.

Les exemples les plus évidents sont les zones spéciales de conservation (ZSC) et zones de protection spéciale (ZPS) du réseau Natura 2000, qui n'interdisent pas, selon leur réglementation, l'apparition d'éoliennes dans leur périmètre. Toutefois, l'implantation d'un parc éolien sera en contradiction avec les objectifs de conservation d'une ZSC ou d'une ZPS si des incidences sont attendues sur la faune, la flore et les habitats de ce site Natura 2000.

De plus, Marx (2017) a montré qu'en France, les éoliennes situées à proximité des ZPS tuent, en moyenne, deux fois plus d'oiseaux que les autres éoliennes, et que ces oiseaux appartiennent bien plus souvent qu'ailleurs à des espèces patrimoniales. En Grèce,

Xirouchakis *et al.* (2019) ont également montré que la mortalité directe par collision d'espèces d'intérêt communautaire, en l'occurrence des vautours fauves *Gyps fulvus*, pouvait être réduite de moitié en préservant les zones Natura 2000 de l'implantation d'éoliennes. Aux États-Unis, c'est l'impact du dérangement occasionné par les éoliennes à proximité des zones d'importance pour les oiseaux qui a été mise en évidence par Miao *et al.* (2019). Pour cela, la LPO et l'ONCFS sont défavorables à l'implantation d'éoliennes en ZPS et recommandent d'éloigner les machines de ces zones.

La réglementation actuelle impose que soit prouvée l'absence d'incidence significative du projet pour que celui-ci puisse être autorisé dans le périmètre ou à proximité d'une zone de protection spéciale (MEEM, 2016) et, de fait, très peu de projets éoliens voient le jour sur ces territoires.

La démarche est similaire dans les aires d'adhésion des parcs nationaux, où l'éolien est envisageable si une absence d'atteinte à l'environnement a été démontrée (MEEM, 2016).

Dans les parcs naturels régionaux (PNR), l'implantation d'éoliennes n'est pas interdite mais sera plus ou moins favorisée selon le parc, qui émet un avis sur les projets liés au territoire (MEEM, 2016).

Même chose pour les réserves de chasse et de faune sauvage (RCFS) et réserves nationales de chasse et de faune sauvage (RNCFS) : l'éolien n'y est pas exclu mais tout projet demande une consultation du gestionnaire et des partenaires (MEEM, 2016).

Les réserves de biosphère n'ont pas un statut réglementaire propre, mais la zone cœur est souvent superposée à une zone possédant son propre statut, comme une RN ou un APB. Dans ce cas, l'implantation d'éolienne n'est pas autorisée sur la zone centrale, mais les zones périphériques et de transition ne sont pas exclues pour ce type de projet.

Les zonages d'inventaire du patrimoine naturel, que sont les zones naturelles d'intérêt écologique pour la faune et la flore (ZNIEFF de type I ou II), ainsi que les zones importantes pour la conservation des oiseaux (ZICO), n'ont pas de statut réglementaire et donc pas d'opposabilité aux projets éoliens, mais nécessitent leur prise en compte lors de l'étude d'impact, notamment pour les ZNIEFF de type I (MEEM, 2016).

Actuellement, de nombreuses ZICO sont intégrées aux ZPS Natura 2000 (MEEM, 2016).

De nombreux autres zonages demandent d'être pris en compte lors de l'étude environnementale afin de s'assurer qu'aucun impact significatif n'aura lieu sur le site. Peuvent notamment être cités les zones humides protégées par la convention Ramsar ou inventoriées par le Muséum national d'histoire naturelle (MNHN), les espaces naturels sensibles des départements (ENS), les espaces littoraux remarquables, les projets d'aires protégées, les espaces acquis par les conservatoires régionaux des espaces naturels, etc.

3.1.3 Habitats et autres aires à prendre en compte

En plus de devoir éviter les zones réglementaires interdisant l'éolien ou le réglementant, d'autres sites et aires naturelles, non réglementaires, doivent être pris en compte afin de prévenir les impacts sur la faune et la flore (Kiesecker *et al.*, 2011 ; Gartman *et al.*, 2016a ; MEEM, 2016).

Pour l'ensemble des taxons, il s'agit notamment d'éviter :

- les zones humides : à la fois des zones de repos et d'alimentation pour les oiseaux d'eau migrateurs et hivernants, ou des sites de chasse pour les chiroptères (Dirksen *et al.*, 1998 ; Giovanello & Kaplan, 2008 ; Nairn, 2011 ; Gartman *et al.*, 2016a ; Roeleke *et al.*, 2016) ; ces zones sont aussi des sites importants pour les amphibiens ;

- les forêts et autres boisements (notamment les peuplements de feuillus) qui accueillent de nombreuses espèces de chiroptères mais aussi d'oiseaux ; ces milieux sont considérés comme des réservoirs de biodiversité abritant de nombreux taxons (Giovanello & Kaplan, 2008 ; Averbeck, 2015 ; Enevoldsen, 2016).

Pour les oiseaux :

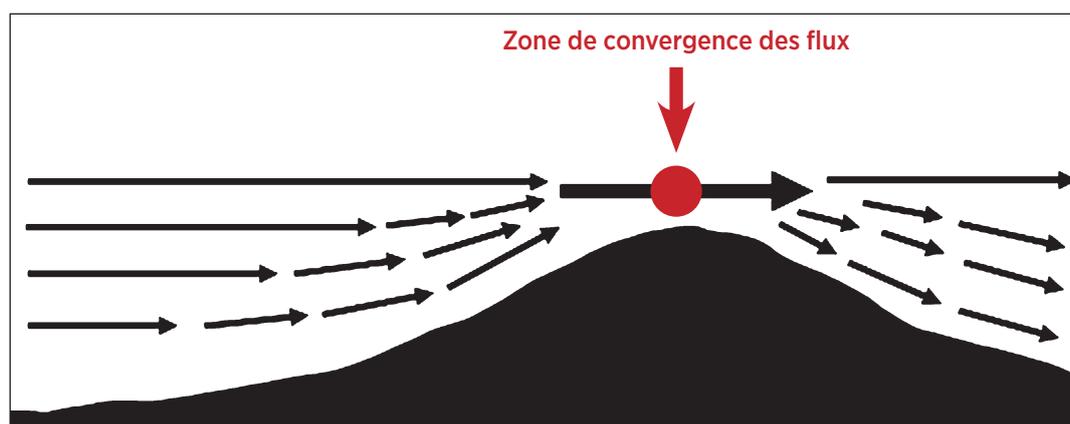
- les sites d'importance : aires d'hivernage, sites de nidification (Carrete *et al.*, 2009 ; Hill *et al.*, 2011) ;
- les espaces vitaux des rapaces sensibles à l'éolien ou menacés, notamment ceux faisant l'objet d'un Plan national d'actions ou d'un Life ;
- les axes de migration importants comme le littoral et les vallées fluviales ;
- les crêtes et falaises qui concentrent les courants (**figure 11**) et favorisent le passage des migrateurs et rapaces à basse altitude (Richardson, 2000 ; Williams *et al.*, 2001 ; Barrios & Rodriguez, 2004 ; Smallwood & Neher, 2004 ; de Lucas *et al.*, 2008 ; Bohrer *et al.*, 2012 ; de Lucas *et al.*, 2012 ; Rodrigues *et al.*, 2015 ; Péron *et al.*, 2017). Ce sont aussi des micro-habitats servant pour la reproduction de rapaces comme l'aigle royal et le grand-duc d'Europe (Johnson *et al.*, 2007 ; Allison, 2012 ; Singh *et al.*, 2016), ou même de leurs proies (Smallwood & Thelander, 2004) ;
- les forêts et autres boisements pouvant accueillir certaines espèces patrimoniales ou sensibles à l'éolien comme la bécasse des bois (Dorka *et al.*, 2014).

Milan Royal, *Milvus milvus*, espèce sensible à l'éolienne faisant l'objet d'un Plan national d'action 2018-2027.



© Fabrice Cahiez

Figure 11 – Concentration des passages migratoires lors du franchissement d'un relief (d'après MEEDDM, 2010)



Pour les chiroptères plus spécifiquement, viennent s'ajouter :

- les gîtes et leurs territoires de chasse associés (Giovanello & Kaplan, 2008 ; Northrup & Wittemyer, 2013 ; Mitchell-Jones & Carlin, 2014 ; Roeleke *et al.*, 2016) ;
- les axes de migration importants comme le littoral et les vallées fluviales (Furman-kiewicz & Kucharska, 2009 ; Telleria, 2009 ; Cryan, 2011) ;
- les forêts et autres boisements (notamment les peuplements de feuillus), qui accueillent de nombreuses espèces de chiroptères. Ces habitats sont des zones de chasse (canopée, lisières, allées forestières) pour de nombreuses espèces mais aussi des sites de nidification ou gîtes pour d'autres, notamment la pipistrelle de Nathusius, chauve-souris migratrice très concernée par les collisions avec les éoliennes (Rodrigues *et al.*, 2015 ; MEEM, 2016) ;
- les linéaires boisés (haies et ripisylves), qui constituent des corridors de déplacement et des terrains de chasse (Kelm *et al.*, 2014) ;
- parmi ces massifs et linéaires boisés, les vieux arbres sont à protéger plus particulièrement, car ils constituent des gîtes pour les espèces arboricoles (Averbeck, 2015 ; Peste *et al.*, 2015) ;
- les crêtes et falaises, micro-habitats servant pour la reproduction de chauves-souris comme le minioptère de Schreibers (Arthur & Lemaire, 2015).

De manière générale, il est prudent de rester éloigné de sites sensibles, comme les réserves, cœurs de parcs naturels ou autres zonages concernant les oiseaux (ZPS, ZICO) et chiroptères (ZSC), que l'éolien y soit proscrit ou non (Langston & Pullan, 2003 ; Carrete *et al.*, 2009 ; Gartman *et al.*, 2016a, MEEM, 2016).

À l'inverse, les paysages agricoles et les friches urbaines et industrielles pourraient être considérés comme des zones favorables à l'implantation d'éoliennes (Leddy *et al.*, 1999 ; Giovanello & Kaplan 2008 ; Obermeyer *et al.*, 2011).

Toutefois, les premiers peuvent accueillir une biodiversité non négligeable. Les plaines agricoles sont utilisées par des espèces d'oiseaux patrimoniales comme les œdicnèmes criards, les outardes ou les busards. Certaines espèces sensibles aux collisions avec les éoliennes, comme le faucon crécerelle ou l'alouette des champs, sont également plus souvent retrouvées au pied des éoliennes situées dans des plaines agricoles plutôt qu'ailleurs (Marx, 2017).

Les paysages de type bocager sont quant à eux très attractifs pour les chiroptères, et constituent des zones de chasse (le long des haies ou dans les pâtures) pour de nombreuses espèces (Arthur & Lemaire, 2015 ; Groupe Chiroptères de la SFEPM, 2016b).

Pour finir, les friches industrielles offrent peu de possibilités d'implantation du fait des nombreuses servitudes techniques et contraintes réglementaires (**photo 7**).

Identifier les zones à enjeux pour les principaux taxons et choisir un site éloigné de toutes ces contraintes sont les premiers pas vers un évitement maximal des impacts négatifs du parc éolien sur la biodiversité (Groupe Chiroptères de la SFEPM, 2016b). Toutefois, seule une étude d'impact sur l'environnement (EIE) réalisée par la suite sur le site permettra de déterminer les enjeux précisément, car certaines sensibilités peuvent être découvertes ou précisées lors de cette phase, comme une colonie de chiroptères encore non connue ou un site de nidification de rapaces sensibles à l'éolien (milans, busards, vautours, aigles, etc.).

Au contraire, choisir un emplacement dans une zone à enjeux modérés ou forts augmente sensiblement le risque d'avoir des impacts négatifs sur la faune et la flore.

Là encore, l'EIE est le seul outil capable de fournir une évaluation correcte des impacts attendus pour le site, mais également de proposer les indispensables mesures d'évitement



Photo 7 – Un parc éolien au milieu de la zone industrielle de Fos-sur-Mer (13). L'implantation à cet endroit aurait pu être une bonne idée, si le site n'était pas sur le littoral.

ou de réduction de ces impacts. Lorsque les enjeux sont trop importants, il est préférable de choisir un autre site plutôt que d'y engager du temps et de l'argent, sans certitude de pouvoir préserver la biodiversité.

Une planification à une échelle suffisamment large (par exemple régionale) est indispensable pour encadrer cette phase d'évitement et mieux prendre en compte les effets cumulés des projets.

3.2 Phase de diagnostic : l'étude d'impact

Les SRE, cartes de sensibilité des espèces ou zonages locaux, mettent en évidence des zones d'exclusions ainsi que des zones présentant des sensibilités plus ou moins importantes vis-à-vis du développement d'un projet éolien. À ce titre, ils sont de formidables outils d'aide au choix d'un site d'implantation et de dimensionnement de l'étude d'impact qui permettront, en définitive, de préciser les enjeux, de dimensionner les mesures de réduction, voire de compensation, et de valider ou non ce projet auprès des services de l'État (MEEM, 2016).

En effet, l'étude d'impact est le document indispensable pour la prise en compte de la faune et de la flore lors du développement d'un projet éolien. Obligatoire pour des éoliennes dont le mât dépasse 50 m (une notice d'impact doit être réalisée pour une hauteur inférieure à 50 m), elle doit permettre de choisir un site adapté et d'y définir les enjeux concernant la biodiversité. Elle aide aussi à l'évaluation des potentiels impacts induits par l'implantation d'un parc éolien à cet endroit. Enfin, le dossier doit proposer – si nécessaire – des mesures pour éviter, réduire voire compenser ces impacts sur l'environnement, que ce soit en phase de construction, d'exploitation ou de démantèlement. Le but final étant d'atteindre une absence de perte nette de biodiversité (MEEM, 2016).

Lors des études conduites sur le terrain, l'utilisation de protocoles adaptés et le recours à des nouvelles technologies permettent non seulement d'obtenir des inventaires de meilleure qualité mais aussi d'aboutir à des mesures de réduction des impacts plus efficaces (May *et al.*, 2015).

Parmi tous les taxons étudiés, les oiseaux et les chiroptères sont ceux sur lesquels les efforts – et l'attention – se concentrent, puisqu'il s'agit des groupes les plus impactés, pouvant subir des dégradations de leurs habitats, des dérangements ou une mortalité directe par collision ou barotraumatisme. Les autres taxons ne doivent toutefois pas être oubliés car les altérations ou destructions d'habitats liés à la construction des éoliennes peuvent avoir des impacts non négligeables sur l'état des populations de plantes, d'insectes ou même d'amphibiens (Lovich *et al.*, 2013). Dans le cadre du développement de projets éoliens en mer, d'autres taxons doivent également être pris en compte (mammifères marins, poissons, mollusques, etc.).

3.2.1 Cadrage préalable : les aires d'étude

Le guide de l'étude d'impact sur l'environnement des parcs éoliens terrestres (MEEM, 2016) rappelle l'importance du cadrage préalable dans le développement des projets. Avant la conduite d'études poussées sur l'environnement et la définition de l'état initial, un cadrage préalable doit être effectué afin de définir les aires d'étude.

Bien que l'emprise du projet au sol puisse sembler faible et n'affecter que peu d'habitats, ses effets sur la faune, et notamment les oiseaux et les mammifères (essentiellement les chiroptères) peuvent avoir une plus grande portée. Pour comprendre qu'il est nécessaire d'appréhender les effets du projet sur une zone géographique étendue, il est important de ne pas oublier que le domaine vital d'un rapace s'étend sur plusieurs milliers d'hectares (et jusqu'à 40 000), et que certaines chauves-souris s'éloignent de presque 30 km de leur gîte chaque nuit pour chasser. Ainsi, l'importance du site dans le fonctionnement écologique de la région peut être appréciée, d'autant que l'EIE doit également prendre en compte les impacts cumulés du projet avec les infrastructures et les parcs et projets éoliens aux alentours (MEEM, 2016).

3.2.2 Définir l'état initial

La seconde étape d'une étude d'impact consiste en la description des enjeux et sensibilités du site retenu, ce qui est rendu possible par l'évaluation de l'état initial du secteur d'étude.

Ce diagnostic de la faune, de la flore et des habitats est primordial car il permet ensuite d'identifier et de mesurer les effets possibles du projet sur le site. Il est d'abord constitué d'une recherche bibliographique permettant d'obtenir une première liste d'espèces « historiquement » présentes dans les aires d'étude ou à proximité, et complété par des investigations de terrain qui précisent et actualisent cette liste, tout en ajoutant des informations essentielles sur l'utilisation du site par ces espèces (nidification, gîtes, aire de repos, etc.), et son importance à différents niveaux (taille des populations présentes, présence d'espèces rares, etc. ; MEEM, 2016).

Ce fonctionnement du secteur d'étude doit être analysé à la fois sur l'ensemble de l'aire concernée (dimension spatiale) et sur un cycle biologique complet, c'est-à-dire une année entière, pour la plupart des taxons (dimension temporelle).

3.2.2.1 Recherches bibliographiques

La récolte des données peut démarrer par une recherche bibliographique qui permettra d'avoir plus de connaissances sur l'utilisation du site, particulièrement par l'avifaune et les chiroptères. Par exemple, le secteur se trouve-t-il sur ou à proximité de voies de migration, d'aires d'hivernage ou de transit, de gîtes de parturition (mise bas) connus, etc. ? La proximité de sites tels que des ZPS, ZSC (Natura 2000) ou de sites protégés par APPB est à relever, car ils permettent de donner des informations sur les espèces présentes, mais peuvent aussi être impactés par le projet. L'examen des aires donnera aussi des informations sur la présence d'habitats ou d'espèces d'intérêt patrimonial ou protégés qui conduiront ensuite à des recherches plus spécifiques sur le terrain si des enjeux existent (MEEM, 2016).

Il convient également de consulter les associations naturalistes locales qui disposent souvent de données précises sur les habitats et espèces présentes.

3.2.2.2 Prospections de terrain

Les protocoles appliqués doivent être adaptés au terrain (forêt, bocage, montagne, etc.), aux multiples groupes étudiés (oiseaux, chiroptères, insectes, plantes, etc.) et aux différentes phases de leur cycle biologique – migration, reproduction, hibernation, hivernage, etc. (voir **tableau 2** ; MEEM, 2016).

Issus de méthodes reconnues et standardisées, ces protocoles évoluent régulièrement afin de suivre les avancées technologiques et réglementaires.

Les chiroptères sont un bon exemple de ces changements, ce taxon n'ayant pas ou très peu été pris en compte jusqu'à la fin du XX^e siècle, avant que ne soient découverts les impacts de l'éolien. C'est ce changement qui a entraîné une modification de la réglementation, obligeant ainsi le développement de nouveaux outils pour faciliter et améliorer l'étude des chauves-souris, devenue une part incontournable dans toute étude d'impact de projet éolien en Europe (Rodrigues *et al.*, 2008).

L'utilisation de méthodes standardisées est d'autant plus importante qu'elle permet des comparaisons de résultats entre sites similaires, mais surtout entre deux périodes sur le même site : avant et après l'implantation des éoliennes.

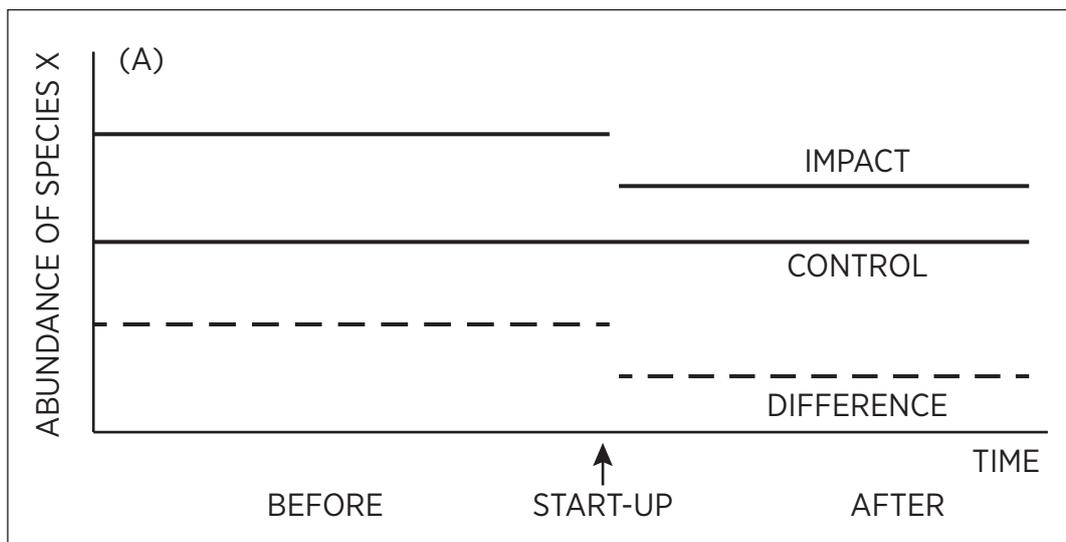
Tableau 2 – Calendrier indicatif des périodes favorables aux inventaires de terrain
(d'après MEEM, 2016)

	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Flore												
Oiseaux nicheurs												
Oiseaux migrateurs												
Oiseaux hivernants												
Chauves-souris												
Amphibiens												
Reptiles												
Mammifères terrestres												
Invertébrés terrestres												

Période principale d'expertise
 Période favorable aux expertises (selon régions et types de milieux)

Il s'agit du principe BACI : *Before-After Control-Impact* qui permet donc d'évaluer simplement l'impact des éoliennes sur le secteur d'étude (**figure 12** ; Stewart-Oaten *et al.*, 1986 ; Roux *et al.*, 2004 ; André, 2009 ; Schwarz, 2012).

Figure 12 – Le principe BACI, contrôle de l'impact sur un site (Stewart-Oaten *et al.*, 1986)



Pour cela, il faut disposer d'un site témoin similaire à celui d'implantation du futur parc, et effectuer des suivis standardisés sur ces deux secteurs avant et après la construction du parc. De cette manière, les facteurs « temps » et « site » sont pris en compte et l'impact potentiel des éoliennes est rapidement visible, et ce sur différentes variables possibles : le nombre d'espèces, le nombre d'individus en migration, la distance aux éoliennes, etc. (Roux *et al.*, 2004 ; André, 2009 ; MEEM, 2016 ; Schwarz, 2012).

Il est donc très important de mettre en place, lors de l'état initial, un protocole facilement reproductible.

Différents protocoles sont applicables en fonction du taxon et de l'objectif à atteindre.

Ainsi, pour l'étude de l'avifaune, il faudra séparer les méthodes en fonction des périodes de l'année et des espèces (rapaces, passereaux, oiseaux d'eau principalement) :

- pour l'avifaune nicheuse : les relevés par station d'écoute selon la méthode de l'indice ponctuel d'abondance (IPA – densité relative) sont un bon moyen de recenser les oiseaux présents dans les différents milieux que compte le site, mais doivent être répétés pour gagner en exhaustivité (Blondel *et al.*, 1970 ; Roberts, 1991). D'autres mesures relatives peuvent être appliquées, telles que les transects : l'indice kilométrique d'abondance (IKA ; Ferry & Frochot, 1958) ou bien la méthode des itinéraires échantillons (IRA). Elles ont toutes des avantages et inconvénients mais elles restent très souples dans leur application et peuvent être mises en œuvre en dehors de la période de reproduction. Le dénombrement d'oiseaux nicheurs territoriaux par la méthode des plans quadrillés ou quadrats (cartographie des territoires) est le seul moyen de connaître précisément la densité absolue (couples, familles, colonies) de toute espèce nichant sur une surface définie ainsi que sa répartition (Blondel, 1969). Les rapaces et oiseaux d'eau, sensibles à l'éolien, sont difficiles à suivre *via* ces méthodes, et réclament donc l'utilisation d'autres approches : inventaires de rapaces nocturnes par écoute nocturne et repasse (Herter & Hicks, 2000 ; Šálek *et al.*, 2013), recherche d'oiseaux en vol, au nid (rapaces), comptages à vue sur de vastes espaces ou autour d'un plan d'eau, en vol ou aux places de chant (oiseaux d'eau), dénombrements aux dortoirs ou des nids (From & Söderman, 1997), etc. (André, 2009 ; MEEM, 2016). De plus, une étude de leur comportement à proximité des emplacements des futures éoliennes est intéressante à mettre en place, et une fois réitérée après implantation, permet de voir de potentielles perturbations dans le comportement des oiseaux (Roux *et al.*, 2004 ; André, 2009) ;



© Denis Roux/ONCFS

Suivi de l'avifaune sur un parc éolien dans la vallée du Rhône : séance d'observation du comportement des oiseaux face à l'éolienne.

- pour l'avifaune migratrice : un point d'observation dégagé et couvrant tout le secteur d'étude est nécessaire pour observer les individus en migration. Plus qu'un dénombrement exhaustif, ce suivi est surtout là pour évaluer la qualité et la quantité d'individus et d'espèces, et donc l'importance du couloir de migration surveillé. En plus du dénombrement et de l'identification des oiseaux, il est surtout important de noter la direction suivie, la hauteur de vol et certains comportements particuliers comme les prises d'ascendance des rapaces et grands voiliers ou les haltes migratoires (André, 2009 ; MEEM, 2016). Lorsque la patrimonialité des espèces l'impose, des outils supplémentaires peuvent être mobilisés, comme les caméras infrarouges ou thermiques, les radars, la télémétrie ou la capture au filet, afin d'obtenir des informations supplémentaires (trajectoires et hauteurs de vol, comportement à proximité des éoliennes) ;
- pour l'avifaune hivernante : des comptages bruts ou par point d'observation permettent d'établir la liste des espèces présentes et leur densité sur le site, et donc d'évaluer son importance pour l'avifaune (André, 2009 ; MEEM, 2016).

Pour les chiroptères, doivent être réalisés :

- des relevés acoustiques (détection des ultrasons) hors période d'hibernation (d'avril à octobre au minimum), pour quantifier et qualifier l'activité des chiroptères et

évaluer l'utilisation du site d'étude (zone de transit, de chasse, de gîte, etc.). Différentes méthodes existent pour réaliser ces relevés : points d'écoute, transects, enregistrements automatiques ou une combinaison de ces trois techniques sont les quatre démarches recommandées et reconnues (Motte *et al.*, 1998 ; Baerwald & Barclay, 2009 ; SER-FEE-SFEPMLPO, 2010 ; Skalak *et al.*, 2012 ; Groupe Chiroptères de la SFEPML, 2016a ; MEEM, 2016). Un suivi d'activité en hauteur (à hauteur théorique de pales) et durant toute la période d'activité est indispensable afin d'évaluer correctement l'activité des chiroptères en plein ciel – comme la chasse et la migration (MEEM, 2016 ; Groupe Chiroptères de la SFEPML, 2016a).



© Philippe Jourdey/LPO

Le suivi de l'activité au sol ne permet pas d'évaluer cette activité en hauteur, notamment pour les espèces de haut vol. En outre, il est presque impossible d'estimer les risques de collision à partir des suivis, qu'ils soient réalisés au sol ou en hauteur, notamment parce qu'une des hypothèses expliquant ces collisions est qu'elles ne sont pas aléatoires. Comme évoqué précédemment, cela signifie que les éoliennes ont un caractère attractif, notamment pour les individus en migration. Par conséquent, il est difficile de mesurer l'activité future et le risque de collision avant leur construction (Brinkmann *et al.*, 2011 ; Ferrer *et al.*, 2012 ; Hein *et al.*, 2013 ; Lintott *et al.*, 2016 ; Mathews *et al.*, 2016). L'installation d'un mât de mesures météorologiques à l'initiative du développeur est un moyen de mettre en place un enregistreur en hauteur. La proximité d'un parc éolien déjà en exploitation et situé dans un milieu similaire peut aussi être utilisée pour le suivi : dans ce cas, l'enregistreur est installé sur une des machines déjà existantes et permet ainsi de tenir compte du possible effet attractif des éoliennes sur les chiroptères (Brinkmann *et al.*, 2011) ;

Suivi acoustique des chiroptères.

- des recherches de gîtes, principalement en hiver pour trouver les colonies d'hibernation, mais aussi en été et en automne pour relever les sites de parturition, de *swarming* ou de reproduction (Groupe Chiroptères de la SFEPML, 2016a).

Concernant la végétation, la détermination des espèces végétales est possible directement sur le terrain par simple observation. L'identification des habitats nécessite quant à elle la réalisation et l'analyse de relevés phytosociologiques permettant de faire ressortir les associations végétales et, parmi elles, les espèces dominantes ou caractéristiques de chaque habitat (Meddour, 2011).

Les stations de plantes protégées et patrimoniales doivent être recensées et localisées précisément (MEEM, 2016).

Bien qu'ils soient impactés de façon beaucoup plus limitée, les mammifères terrestres (autres que les chiroptères) et semi-aquatiques, les reptiles, les amphibiens et les insectes peuvent être concernés par la perte d'habitats ou les ruptures de continuités écologiques entraînées par l'implantation des éoliennes et des infrastructures afférentes (Alvares *et al.*, 2011 ; Colman *et al.*, 2012 ; Gonzales *et al.*, 2016). Il convient donc de réaliser des investigations de terrain pour ces taxons afin de détecter la présence d'espèces protégées. S'ajoutent à cela :

- pour les amphibiens : une recherche des habitats fréquentés et des voies de déplacements. Les espèces sont plus facilement observables en phase aquatique et peuvent

être identifiées visuellement de jour ou de nuit, par observation visuelle directe, écoute du chant (avec repasse ou non) ou *via* les pontes et larves. Des sorties au printemps et à l'automne (en périodes de précipitations) peuvent permettre d'identifier les voies de migration (MEEM, 2016) ;

- pour les reptiles : les inventaires se font par observation visuelle directe de jour ou par relevé d'indices de présence (pontes et mues). Des caches artificielles peuvent être utilisées pour attirer les individus et augmenter les chances d'observation (Graitson & Naulleau, 2005 ; Olivier & Maillet, 2013) ;
- pour les insectes (odonates, lépidoptères, orthoptères et coléoptères principalement) : l'identification des micro-habitats utilisés (zones humides pour les odonates, plantes-hôtes pour les lépidoptères) permet d'aiguiller les recherches, qui peuvent ensuite être réalisées par observation directe des différents stades (œufs, larves, adultes), capture au filet, pose de pièges d'attraction (alimentaires, lumineux, olfactifs, sexuels) ou d'interception (au vol, au sol), etc. (Dommanget, 1991 ; Nageleisen & Bouget, 2009 ; Roy *et al.*, 2015 ; Maynou *et al.*, 2017).

3.2.2.3 Évaluation des enjeux et sensibilités

Une fois les données récoltées sur le terrain ou grâce à la recherche bibliographique, il est impératif de les replacer dans le contexte écologique et réglementaire. Cela demande notamment d'établir la liste des espèces et habitats rares, protégés (aux niveaux régional, national et européen), d'intérêt patrimonial (selon la directive Habitats) et menacés (listes rouges régionales, nationales, européennes).

De cette façon, cette analyse permet de définir, pour une espèce, l'importance de sa population sur le secteur d'étude par rapport à l'état général des populations de cette espèce et son évolution, à différents niveaux (région, pays, etc.). Il s'agit donc d'évaluer l'enjeu de conservation de chaque espèce en répondant à la question suivante : si la population du site d'étude est impactée, quelles en seront les conséquences pour l'espèce en général, à court ou à long terme ? (MEEM, 2016).

Cette analyse est aussi faite en fonction des milieux présents : une parcelle de blé présentera moins d'enjeux qu'un boisement mixte, car cette dernière attire plus de biodiversité (chiroptères, insectes, etc.).

Cette définition des enjeux se fait sans prendre en compte le type de projet (éolien ici) pour lequel est réalisée l'étude.

À l'opposé, la sensibilité à l'éolien des espèces doit, elle aussi, être mise en avant. Elle concerne principalement les chiroptères et les oiseaux, et varie selon l'espèce considérée. En effet, cette notion est définie par l'écologie des espèces (mœurs migratoires, hauteur de vol, technique de chasse, etc.) mais aussi par les impacts connus de l'éolien sur celles-ci.

3.2.3 Définir les impacts

Pour rappel, les principaux impacts potentiels (directs ou indirects) de l'éolien sur l'avi-faune et les chiroptères sont les suivants : collision, dérangement, effet barrière, altération ou destruction d'habitats. Ce dernier point concerne aussi les autres taxons : flore, mammifères hors chauves-souris, insectes, amphibiens et reptiles (Lovich *et al.*, 2011 ; Gonzales *et al.*, 2016).

Tous les oiseaux et chauves-souris ne sont pas concernés de la même manière par l'ensemble de ces impacts. En effet, la perte ou la modification d'habitats concerne

principalement l'avifaune nicheuse et les populations de chauves-souris locales (Zimmerling *et al.*, 2013 ; Roeleke *et al.*, 2016), l'effet barrière concerne tout aussi bien les oiseaux que les chauves-souris (Pruett *et al.*, 2009 ; Villegas-Patracca *et al.*, 2014, Roeleke *et al.*, 2016), tout comme la mortalité qui a toutefois tendance à se concentrer sur certains groupes ou espèces (passereaux migrateurs, rapaces, laridés, apodiformes, chauves-souris de haut vol).

De plus, d'autres éléments influent sur l'importance de ces impacts : le site d'étude (emplacement, relief, climat, autres infrastructures aux alentours, etc.), les éoliennes (nombre, disposition, caractéristiques des machines, etc.).

C'est en croisant ces informations avec les enjeux, sensibilités et vulnérabilités définis lors de l'état initial que les impacts peuvent être évalués. Ces derniers doivent être différenciés en fonction des taxons et des espèces, des phases biologiques et des différents habitats du secteur d'étude, afin d'obtenir une vision plus juste et précise de leur portée sur les populations et les habitats tout au long de l'année et sur l'ensemble des aires d'études.

Il est aussi important d'évaluer les parts d'impacts temporaires et d'impacts permanents, et de rendre compte des impacts générés par les phases de construction et de démantèlement.

Cet effort de précision est indispensable pour ensuite mieux aborder les mesures d'atténuation à mettre en place. Systématiquement, plusieurs variantes d'implantation des éoliennes sont proposées pour le parc ; la variante qui générera le moins d'impacts sera retenue et sera celle sur laquelle les efforts d'atténuation seront portés.

Bien que difficiles à évaluer, les impacts cumulés doivent également être pris en compte, notamment avec les lignes à haute tension, les infrastructures linéaires de transport, l'urbanisation et les autres parcs éoliens existants ou en projet. Ensemble, ces différentes infrastructures peuvent fragmenter les territoires ou augmenter sensiblement le risque de mortalité chez les oiseaux et chiroptères.

3.2.4 Mettre en place des mesures d'atténuation

Si l'évaluation des effets du parc a révélé des impacts négatifs sur l'environnement, il est alors indispensable de mettre en place des mesures pour atténuer ces impacts. Il convient de suivre la démarche ERC, c'est-à-dire de donner la priorité à l'évitement des impacts puis de proposer des mesures visant à réduire les impacts qui n'ont pu être évités. En dernier recours, il s'agit de proposer des mesures compensatoires, l'objectif étant d'aboutir à une absence de perte nette de biodiversité, voire un gain de biodiversité selon les termes de la loi n° 2016-1087 du 8 août 2016 pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages qui a été publiée au *Journal officiel* du 9 août 2016.

Pour le cas d'un projet éolien, de nombreuses mesures sont envisageables pour éviter, réduire et compenser ces effets négatifs. Elles peuvent intervenir à différents stades du projet :

- dès la planification puis lors du *micro-siting*, le choix du site et la localisation des machines sur le site lui-même sont de très bons moyens d'éviter et de réduire la majorité des impacts (Jones *et al.*, 2009 ; Zimmerling *et al.*, 2013 ; MEEM, 2016) ;
- en phase de construction (et de démantèlement), pour éviter les répercussions d'un chantier sur la faune et la flore (altération et destruction d'habitats, pollutions, dérangement, mortalité) ;
- lors de l'exploitation, avec la mise en place de mesures visant notamment à réduire la mortalité ou le dérangement dus au fonctionnement, comme l'asservissement

des machines, l'installation de systèmes de dissuasion acoustique ou visuelle ou la mise en œuvre de mesures de génie écologique (Gartman *et al.*, 2016b ; Groupe Chiroptères de la SFPEM, 2016a ; MEEM, 2016).

Les possibilités sont multiples et devraient encore s'élargir dans les prochaines années, mais les preuves d'efficacité manquent pour certains dispositifs visant à réduire la mortalité. En effet, peu de recherches ont été effectuées dans ce domaine encore trop récent où il manque donc un retour d'expérience et un certain recul (Gartman *et al.*, 2016a & 2016b).

L'étape de l'étude d'impact est le meilleur moment pour concevoir et mettre en place des mesures réfléchies et adaptées aux problématiques. Intervenir plus tard, après l'apparition des impacts qui ont été prévus (ou pas) lors de l'étude, est souvent plus difficile et plus coûteux (Giovanello & Kaplan, 2008).

Seules des mesures ayant fait la preuve de leur efficacité devraient pouvoir être proposées pour réduire les impacts du projet sur la biodiversité. Cela n'empêche pas, au contraire, de mettre en œuvre des dispositifs expérimentaux sur des parcs présentant de forts enjeux de biodiversité, mais ceux-ci doivent alors s'inscrire dans un « plan de gestion » plus large et ne peuvent se suffire à eux-mêmes.

3.2.4.1 Mesures en phase de développement du projet

La phase de développement comprend toute la période s'achevant avec l'obtention de l'autorisation environnementale. Les principales mesures d'atténuation envisageables à ce stade sont le choix de l'emplacement du parc (voir p. 59, Cadrage préalable : les aires d'études), du nombre et de la localisation précise des éoliennes.

Disposition des machines sur le site

En plus du choix de l'emplacement du parc (*macro-siting*), le choix du nombre d'éoliennes et leur implantation dans le secteur retenu (*micro-siting*) sont aussi des moyens de diminuer les impacts. Les paramètres qui peuvent être contrôlés concernent les éoliennes (nombre de mâts, localisation sur le site et leur position entre eux) mais également les infrastructures annexes (chemins d'accès, poste de livraison électrique, raccordement inter-éoliennes).

De la même manière que le choix du site se fait en évitant les zones sensibles, le choix de l'emplacement des machines sur le site doit être fait de façon à s'éloigner au maximum des habitats sensibles qui y sont potentiellement présents, comme les haies, fossés, boisements, zones humides, etc. (May *et al.*, 2015 ; Gartman *et al.*, 2016a). D'autres éléments comme les falaises et crêtes, et plus particulièrement leur côté exposé au vent (**photo 8**), doivent être évités pour limiter les risques pour les rapaces (Smallwood & Neher, 2004, May *et al.*, 2015).

Ces mesures d'éloignement sont aussi efficaces à l'échelle régionale qu'à l'échelle du site lui-même.

In fine, déplacer ou retirer les éoliennes présentant les plus grands risques de collision est la mesure qui devrait être mise en œuvre de façon prioritaire lorsque des impacts sur des sites spécifiques sont attendus (May *et al.*, 2015).

Une fois les zones sensibles écartées, il est préférable de disposer les éoliennes en ligne, et d'éviter certaines dispositions comme celles en X, qui forcent les oiseaux à passer au plus près des éoliennes quand ils s'engagent entre deux rangées.



Photo 8 – Parc éolien dans la Drôme. L’installation d’éoliennes à proximité de falaises et de crêtes, où peuvent nicher rapaces diurnes et nocturnes, est à proscrire, surtout quand elles se situent face aux vents dominants.

Sur certains sites, une disposition en grappe des machines pourrait rendre la zone interne plus difficile d’accès aux oiseaux et pourrait provoquer un évitement plus fort qu’une disposition en ligne (Larsen & Madsen, 2000 ; Smallwood & Thelander, 2005 ; May *et al.*, 2015).

Des distances importantes entre chaque machine, ainsi que leur hauteur actuelle, laissent des espaces suffisants sous la zone balayée par les pales et entre les éoliennes pour permettre à la plupart des oiseaux locaux de traverser le parc. Cependant, cela peut augmenter les risques de collision pour les individus qui ne percevaient pas le danger que représentent ces éoliennes et qui ne voient pas le parc comme un seul obstacle à contourner dans son ensemble.

Au contraire, une ligne de machines plus resserrées sera généralement moins engageante pour les oiseaux et l’effet barrière sera moins étendu (Drewitt & Langston, 2006 ; May *et al.*, 2015 ; Gartman *et al.*, 2016a).



Petit parc éolien de trois machines implanté dans la vallée du Rhône ; la collision des oiseaux avec les pales est moindre lorsque les machines sont positionnées parallèlement au couloir de migration de l’avifaune.

Pour compléter ces mesures, la disposition des éoliennes par rapport aux couloirs de vol et de migration est aussi à contrôler, que ce soit pour les oiseaux ou pour les chauves-souris.

Dans l'idéal, il faudra éviter au maximum ces couloirs. Si cela s'avère impossible, par exemple s'il s'agit d'une voie de passage large et diffuse, il est alors fortement conseillé, pour limiter au maximum les risques de collision, d'installer les éoliennes sur une ligne parallèle aux axes de déplacement, et non perpendiculaire (Drewitt & Langston, 2006 ; Hüppop *et al.*, 2006 ; Dai *et al.*, 2015). L'effet barrière provoqué par une ligne d'éoliennes est aussi grandement diminué par cette orientation. Il convient également d'éviter les implantations en X, en L ou en Y (Soufflot, 2010).

Si plusieurs rangées d'éoliennes sont prévues, des couloirs de vol doivent être aménagés entre elles pour éviter aux oiseaux soit de contourner l'ensemble du parc, soit de risquer la collision lorsqu'ils passent à travers (Drewitt & Langston, 2006). Une distance d'au moins 1 250 m entre deux rangées peut être préconisée (Soufflot, 2010).

Enfin, si plusieurs parcs sont prévus dans une zone de migration, il est indispensable de les espacer de plusieurs kilomètres les uns des autres pour préserver des couloirs (Hüppop *et al.*, 2006).

Selon Baerwald & Barclay (2011), pour les chauves-souris, ce n'est pas l'emplacement de l'éolienne dans la rangée qui influence la mortalité, mais son implantation dans le parc : sur un site où la majorité des individus en migration arrivent par le nord, la mortalité est plus forte au niveau des éoliennes situées le plus au nord. Il convient donc d'identifier les couloirs de vol et de migration des chiroptères aussi bien que ceux des oiseaux, les premiers étant plus touchés que les seconds.

L'espacement de parcs éoliens de plusieurs kilomètres des uns aux autres permet de préserver les couloirs de migration.



© Claude Labro

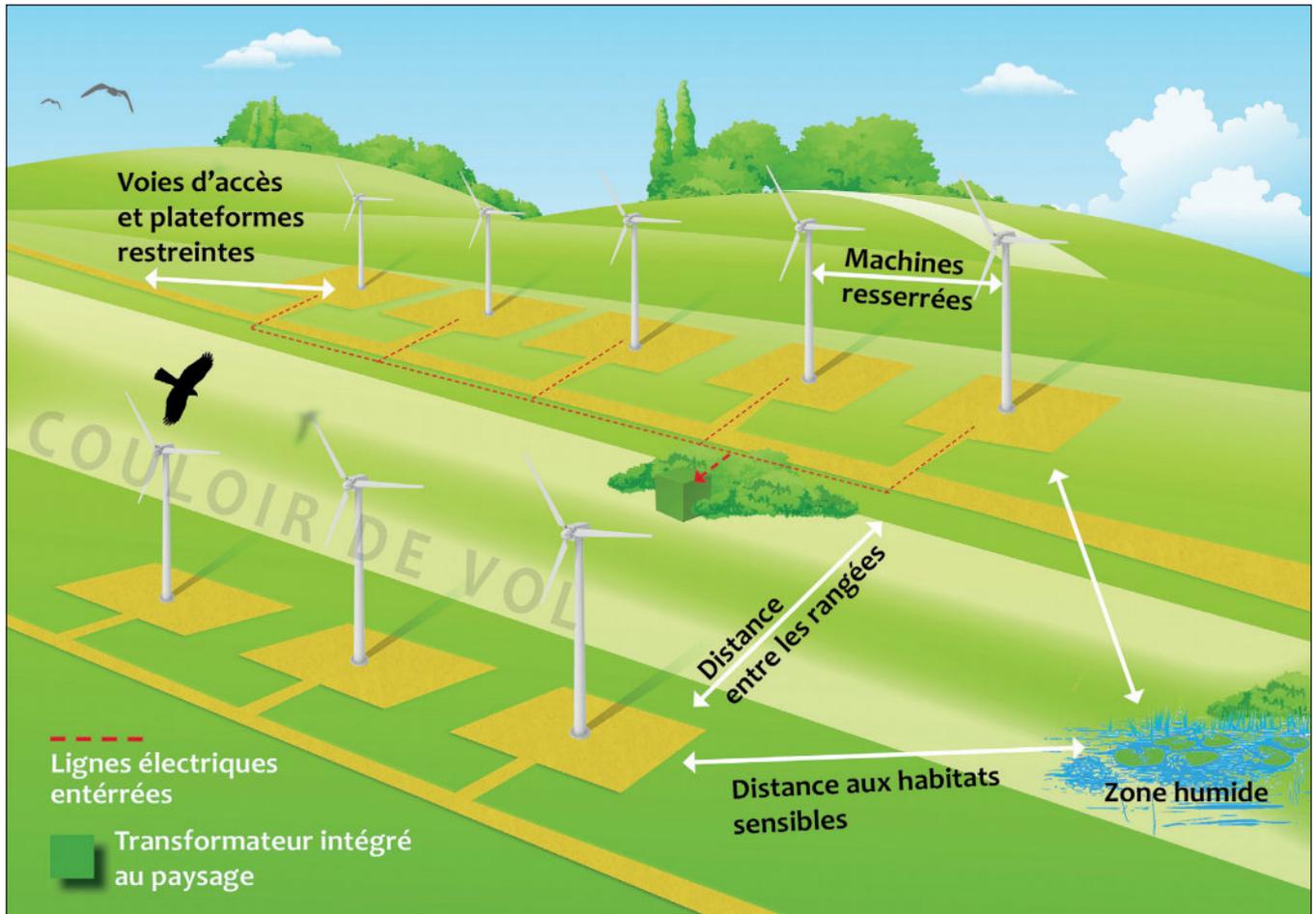
Bien que le raccordement du parc au réseau électrique ne concerne pas directement l'emplacement des machines, le principe d'enfouissement, obligatoire en France, prévaut pour cette installation et permet d'éviter les risques de mortalité supplémentaires induits par des lignes aériennes (principe limitant aussi l'impact paysager).

La **figure 13** illustre quelques mesures permettant de mitiger les impacts lors de la disposition des machines sur le site.

Caractéristiques des machines

Après avoir travaillé sur l'emplacement du parc, puis sur la localisation des machines, il convient de s'intéresser aux caractéristiques techniques de celles-ci. Le choix du type de mât, les dimensions de l'éolienne et son éclairage (balisage obligatoire et luminaires supplémentaires) sont, en effet, de nature à réduire les risques de collisions.

Figure 13 – Quelques mesures permettant de mitiger les impacts lors de la disposition des machines sur le site
(Source : ONCFS)



En Europe, les mâts tubulaires autoporteurs sont presque exclusivement utilisés pour les éoliennes, contrairement aux États-Unis qui ont préféré les tours en treillis, même si cette tendance a récemment changé (May *et al.*, 2015). En effet, ces derniers permettent aux oiseaux d'y construire leur nid, ce qui augmente les risques de mortalité (Erikson *et al.*, 2002 ; Berg, 1996 cité dans Manville II, 2005).

Le développement de l'industrie se dirige vers la conception d'éoliennes aux mâts de plus en plus hauts et aux pales de plus en plus longues. En Europe, les éoliennes ont déjà atteint l'espace aérien occupé par les chauves-souris migratrices, un espace que leurs équivalentes nord-américaines sont également en train de conquérir (Arnett *et al.*, 2008).

Cependant, c'est l'augmentation de la longueur des pales (et donc l'augmentation de la surface que celles-ci balayent) qui influencerait le plus le risque de collision en Europe (Rydell *et al.*, 2010a ; Mathews *et al.*, 2016).

Concernant l'avifaune, il est probable qu'à enjeux locaux égaux, des mâts et des diamètres de rotors plus grands présenteront un risque de collision plus important que de plus petites éoliennes (de Lucas *et al.*, 2008). Il est toutefois difficile de montrer cette corrélation car de nombreux paramètres autres que les caractéristiques des éoliennes influencent le risque de collision sur un site donné (Barclay *et al.*, 2007). Quoi qu'il en soit, la réduction du nombre de machines (le remplacement de nombreuses éoliennes de petit gabarit par quelques grandes) peut être un facteur de réduction des impacts à l'échelle du parc.

Par exemple, en France, ce sont les plus petites éoliennes (les plus anciennes) qui présentent le plus grand nombre de collisions, mais leur emplacement à proximité de ZPS est le facteur principal de cette mortalité (Marx, 2017).

La hauteur du bas des pales (la garde au sol) apparaît également comme un facteur influençant le risque de mortalité par collision. Grajetzky *et al.* (2010) ont montré qu'il était possible de réduire ce risque de 50 % pour les busards cendrés en faisant passer cette hauteur de 20 à 30 m. Cette hauteur de 30 m est également préconisée pour réduire le risque de mortalité des chiroptères.

Certaines espèces d'oiseaux évoluant plus haut, comme les milans royaux, pourraient nécessiter d'augmenter encore cette garde au sol.

Enfin, les projets en forêt nécessitent également des profils de machines particuliers de manière à laisser le maximum de place entre la canopée et les pales.

Bien que les développeurs cherchent souvent à intégrer leurs éoliennes dans le paysage pour diminuer leur impact visuel, certains chercheurs ont proposé d'augmenter la visibilité des machines pour réduire le risque de collision pour les oiseaux.

Hodos *et al.* (2001) et Hodos (2003) ont ainsi montré qu'à une certaine distance, certains oiseaux n'étaient pas capables de distinguer les pales en rotation à cause de leur vitesse (flou cinétique), et que le meilleur moyen de les rendre visibles était de peindre en noir une pale par machine.

Les peintures réfléchissant les rayons ultraviolets sont une autre méthode proposée pour réduire les risques de collision, mais leur efficacité n'a pas été démontrée (Curry & Kerlinger, 2000 ; Young *et al.*, 2003 ; Cook *et al.*, 2011). Long *et al.* (2011) proposent quant à eux de choisir la couleur de l'éolienne en fonction de son attractivité pour les insectes.

Toutefois, au vu des connaissances sur la vision des oiseaux et de leur perception variée des mouvements (Hodos *et al.*, 2001 ; Hodos, 2003 ; Martin & Shaw, 2010 ; Martin, 2011), il est difficile de trouver une méthode ou une couleur qui sera efficace pour une majorité d'entre eux, mais aussi pour les chiroptères.

De plus, la réglementation française actuelle limite grandement les possibilités de modifier l'aspect des machines : la palette des couleurs applicables est très restreinte (une dizaine de valeurs seulement qui vont du blanc au gris clair) et ne permet donc pas, contrairement aux parcs situés en Allemagne ou au Canada, de peindre le bas des mâts en vert ou d'installer une pale noire afin d'augmenter sa visibilité vis-à-vis des oiseaux (MEEM, 2016).

De la même manière, Dooling (2002) propose de rendre les éoliennes plus audibles en installant des sifflets ou équivalents sur les pales. Toutefois, cela risque de causer des nuisances sonores pour le reste de la faune, ainsi que pour les riverains.

Plusieurs hypothèses ont été émises quant à l'influence du balisage des éoliennes sur le risque de collision des chiroptères (Kunz *et al.*, 2007 ; Cryan & Barclay, 2009), mais jusqu'à présent, aucune étude n'a montré de différence de mortalité entre des machines balisées et des machines non balisées (Erickson *et al.*, 2002 ; Erickson *et al.*, 2004 ; Johnson *et al.*, 2004 ; Arnett, 2005 ; Fiedler *et al.*, 2007 ; Arnett *et al.*, 2008 ; Bennett & Hale, 2014).

Les réponses de l'avifaune au balisage sont différentes et varient en fonction du type d'éclairage et des conditions météorologiques : des lumières fixes (par opposition aux clignotantes) sont plus attractives pour les migrateurs (Gehring *et al.*, 2009), notamment en cas de mauvais temps (brouillard, forte pluie) où elles constituent un point de repère pour les oiseaux (Erickson *et al.*, 2004 ; MEEDDM, 2009 ; Blew *et al.*, 2013).

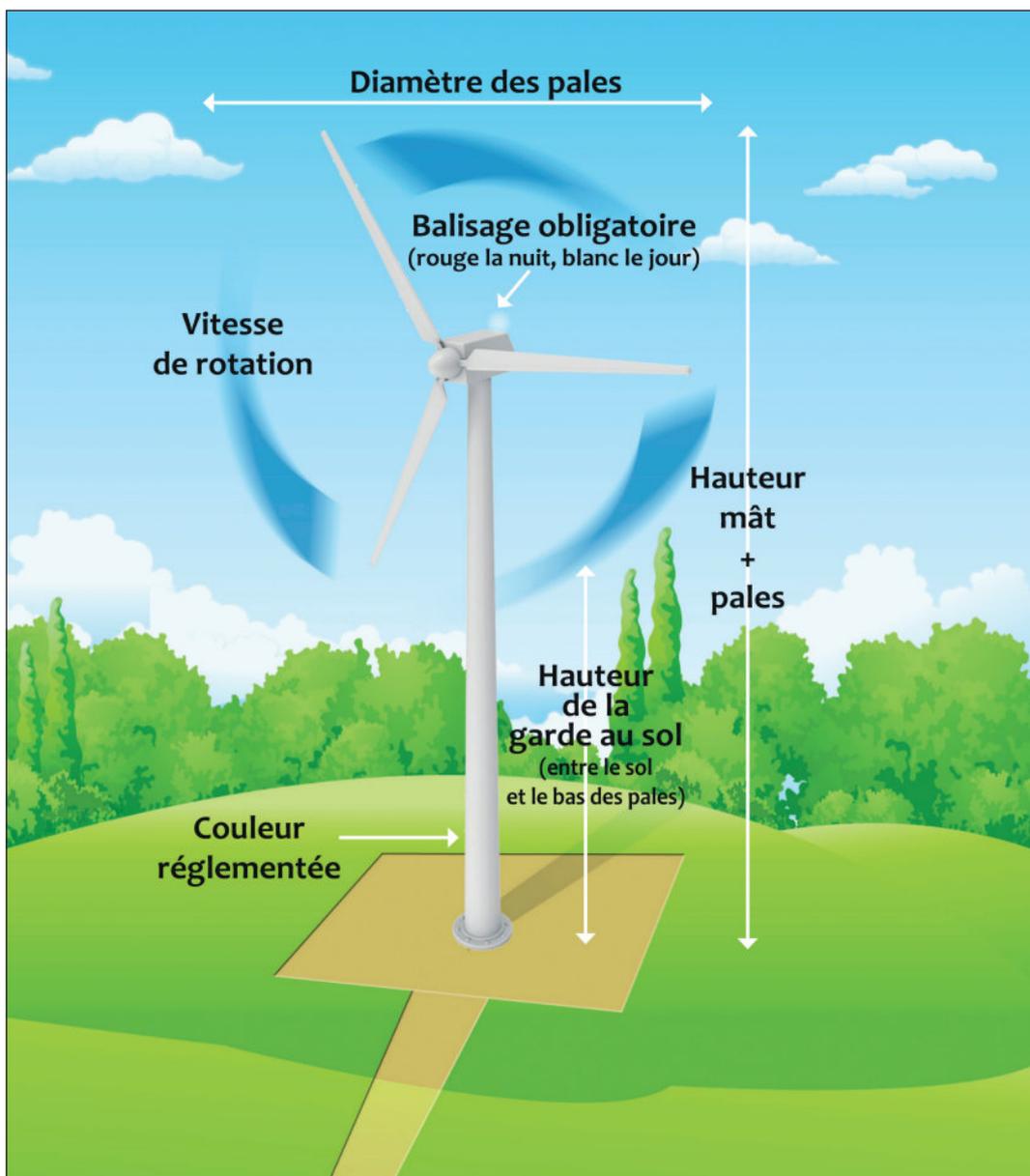
Les éoliennes avec feux clignotants ne semblent pas provoquer plus de mortalité que des éoliennes non éclairées (Erickson *et al.*, 2004 ; Arnett, 2005 ; Fiedler *et al.*, 2007 ; Gehring *et al.*, 2009 ; Kerlinger *et al.*, 2010).

La solution semble donc être de limiter le balisage des machines avec des feux rouges clignotants, et en France, la réglementation actuelle va dans ce sens : il y a obligatoirement un feu clignotant rouge par mât la nuit, puis un feu rouge fixe sur le mât à 45 m si la hauteur de la machine dépasse les 150 m. Chaque tranche de 50 m de hauteur supplémentaire oblige à rajouter un feu rouge fixe le long du mât (Kerlinger *et al.*, 2010 ; MEEM, 2009 ; MEEM, 2016). Toutefois, les mesures annoncées en janvier 2018 pour simplifier le développement de l'éolien prévoient que certains feux de balisage puissent être fixes et non plus clignotants.

L'éclairage additionnel, par exemple des voies d'accès, de la plate-forme ou de la porte d'entrée du mât, est à proscrire.

Enfin, il est recommandé, dans le cadre de l'utilisation d'un mât de mesures météorologiques lors de la phase de planification/de diagnostic, de munir les haubans du mât (s'il y en a) de dispositifs d'effarouchement des oiseaux afin d'éviter les collisions avec les câbles (APLIC, 1994 dans Manville II, 2005). La **figure 14** illustre les principaux paramètres liés aux machines et pouvant influencer les risques de collision avec la faune.

Figure 14 – Les paramètres liés aux machines et pouvant influencer les risques de collision avec la faune (Source : ONCFS)



3.2.4.2 Mesures en phase de chantier

La construction d'un parc éolien comprend non seulement l'édification des machines, mais aussi l'aménagement voire la création de routes d'accès, des raccordements inter-éoliennes et au réseau ainsi que l'installation de bâtiments annexes permanents (transformateurs électriques) ou temporaires (cabanes de chantier). Tous ces aménagements entraînent nécessairement une intense activité humaine autour de la zone de chantier, activité qui elle-même provoque du dérangement et éventuellement des altérations des milieux et des pollutions.

Pour limiter l'impact de l'homme sur l'environnement pendant cette phase de chantier, il existe plusieurs méthodes simples à mettre en place pour préserver les différents taxons concernés, méthodes qui ne sont pas spécifiques aux chantiers éoliens mais qui s'y appliquent tout aussi bien.

Concernant la végétation, le marquage des stations d'espèces protégées permet d'éviter leur dégradation. À cela, il faut ajouter des précautions concernant les espèces exogènes invasives, comme par exemple éviter d'exporter la terre du chantier et prévoir une zone de stockage pour ces déblais (Giovanello & Kaplan, 2008).

La délimitation du chantier avec des barrières ou des rubans est un bon moyen de limiter les débordements d'activité humaine et de réduire la dégradation des habitats environnants (Drewitt & Langston, 2006). L'installation d'une clôture pendant la phase de chantier permet quant à elle de limiter les collisions entre véhicules et animaux. Bien que cela semble être une mesure évidente pour limiter les impacts, il n'existe actuellement pas de travaux scientifiques démontrant l'efficacité de telles barrières (Gartman *et al.*, 2016a). Celle-ci permettrait aussi de diminuer les pertes d'habitats associées au développement éolien, qui sont considérées comme une plus grosse menace pour les oiseaux que les risques de collision (Kuvlesky Jr. *et al.*, 2010), mais qui concernent aussi tous les autres taxons : reptiles, amphibiens, mammifères (Lovich & Ennen, 2013).

En premier lieu, il est préférable d'éviter les périodes de nidification des espèces d'oiseaux sensibles au dérangement et présentes sur le site (Drewitt & Langston, 2006 ; Pearce-Higgins *et al.*, 2012). Limiter ainsi la phase de chantier peut aussi être profitable pour d'autres taxons : mammifères, amphibiens, reptiles.

Il en est de même pour les chiroptères, dont les périodes d'activité intense et d'hibernation devront être soustraites au calendrier de construction si des gîtes de reproduction ou d'hivernage sont connus à proximité (là aussi, la connaissance du site en phase d'étude d'impacts est primordiale).

Une autre mesure à instaurer est la réduction des vitesses de circulation des véhicules sur le chantier, qui permet entre autres de réduire les risques de collision avec des animaux mais limite aussi la production de poussière et la pollution sonore qui affectent aussi bien la faune que la flore (Giovanello & Kaplan, 2008).

Le dérangement des animaux, les risques de mortalité (collision avec les véhicules, destruction des terriers) et la pollution (lumière, bruit, poussière, vibrations) sont eux aussi modérés par ce genre de mesures qui réduisent les surfaces impactées (Giovanello & Kaplan, 2008).

Une concertation avec le maître d'œuvre ainsi qu'une présentation des mesures aux ouvriers permettent de garantir leur succès (Drewitt & Langston, 2006). Un suivi régulier du chantier par un écologue permet d'évaluer leur efficacité et d'adapter les moyens et méthodes si besoin. La **figure 15** illustre les mesures à prendre lors du chantier de construction pour éviter les dommages sur le milieu, la faune et la flore sauvages.

Figure 15 – Les mesures à prendre lors du chantier de construction pour éviter les dommages sur le milieu, la faune et la flore sauvages (Source : ONCFS)



3.2.4.3 Mesures en phase d'exploitation

Lors de la phase d'exploitation, c'est principalement la mortalité que les mesures mises en place vont chercher à diminuer.

À l'heure actuelle, de nombreuses méthodes et outils d'atténuation existent, mais peu ont encore prouvé leur efficacité. Ces techniques sont réparties en quatre grandes catégories :

- augmenter l'attractivité hors site, par la restauration et la conservation des milieux en dehors du parc éolien (mais à proximité) ;

- s'assurer que l'aménagement du site ne conduise pas à en augmenter l'attractivité pour les espèces cibles, en mettant en œuvre une gestion appropriée du couvert végétal ;
- utiliser des moyens de dissuasion pour repousser les animaux qui s'approcheraient trop près des machines en fonctionnement ;
- intégrer des procédures de bridage/asservissement des machines, c'est-à-dire des arrêts programmés des éoliennes en fonction des conditions météorologiques, de la saison ou même de la proximité directe d'un oiseau ou d'une chauve-souris.

Diminuer l'attractivité du site

Pour diminuer l'attractivité du site, il convient de diminuer la qualité des habitats présents, notamment ceux exploités par l'avifaune et les chiroptères, mais aussi par leurs proies. Cette méthode se réalise donc par une gestion appropriée des milieux présents, qui demande au préalable une connaissance des espèces fréquentant le site, connaissance normalement acquise lors de la phase d'état initial.

Les recherches se sont concentrées sur les rapaces, avec plusieurs propositions pour éviter la présence de leurs proies comme les micro-mammifères (mais également les reptiles, proies de prédilection du circaète Jean-le-Blanc) :

- ne pas créer ou conserver des micro-habitats favorables comme des amoncellements de pierres (Smallwood & Thelander, 2004) ;
- ne pas tondre ou faucher avant mi-juillet (Aschwanden *et al.*, 2005) ;
- garder une végétation dense et assez haute (type fourrés, buissons) qui ne convient pas pour la chasse des rapaces (Barrios & Rodrigues, 2004 ; Cordeiro *et al.*, 2013) ;
- suivant les espèces cibles, il peut au contraire être préférable d'entretenir très régulièrement les plateformes et de réaliser les abords en graves pour éviter un développement de la végétation qui favorise les chiroptères et les oiseaux (Pescador *et al.*, 2018).

Pour réduire le risque de collision des oiseaux charognards avec les éoliennes, l'implantation de celles-ci doit être évitée à proximité des charniers et décharges à ciel ouvert (Manville II, 2005 ; Martínez-Abraín *et al.*, 2012).

Bien que les espaces agricoles puissent être considérés comme de bons sites pour implanter un parc éolien, car la biodiversité y est moins riche, ces milieux présentent également des inconvénients. En effet, l'abondance en nourriture pour les rapaces y semble élevée et leur présence plus importante, les mammifères constituant leurs proies ayant eux-mêmes une nourriture en grande quantité grâce aux cultures (Rasran *et al.*, 2010). Ces espaces nécessitent donc eux aussi une gestion appropriée (Mammen *et al.*, 2011).

Certaines de ces recommandations s'appliquent aussi aux chiroptères, notamment la nécessité de ne pas avoir de bétail et de pâtures sous les éoliennes ou à proximité directe, car ce type de milieu est exploité par certaines espèces.

De plus, créer des haies ou autres linéaires boisés proches des machines n'est pas recommandé car cela procure des couloirs de déplacements ou des zones de chasse aux chauves-souris, et augmente donc potentiellement les risques de mortalité. Une zone dégagée, à végétation rase non pâturée ou cultivée, est donc appropriée pour éviter d'attirer les chiroptères.

Toutefois, prendre en compte toutes les espèces peut se révéler difficile en termes de gestion de milieux : une végétation rase peut réduire l'activité des chiroptères mais risque, par la même occasion, d'attirer des rapaces ; et inversement avec une végétation haute et dense.

Que faire dans le cas où le site accueille à la fois des rapaces et des chauves-souris ? De plus, comment incorporer à ces mesures celles concernant la sécurité (risque d'incendie par exemple) et l'entretien obligatoire des plateformes de maintenance ? À cela s'ajoutent encore les suivis de mortalité à réaliser au pied des éoliennes, beaucoup plus difficiles à faire si la végétation n'est pas très basse et clairsemée.

Il est donc très complexe de considérer tous ces aspects et d'en dégager un mode de gestion idéal et applicable à l'ensemble des parcs éoliens. La réflexion doit donc se faire au cas par cas, mais même à cette échelle, la tâche peut se révéler difficile.

Augmenter l'attractivité des habitats à proximité

En complément d'une gestion adaptée des habitats présents sur le site du parc éolien, l'amélioration ou la création de milieux favorables plus éloignés afin d'y attirer la faune sont des moyens de réduire les collisions.

Améliorer la qualité des milieux, notamment la disponibilité en nourriture et en sites de nidification, fonctionne très bien avec les rapaces et permet de les attirer à distance des éoliennes (Paula *et al.*, 2011a).

Cela peut passer par des programmes de repeuplement en lapins et autres proies (Paula *et al.*, 2011a), la création de charniers pour les vautours et autres charognards (**photo 9**) et l'installation de plateformes artificielles pour la nidification (Cortés-Avizanda *et al.*, 2010, Sanz-Aguilar *et al.*, 2015).

Toutefois, les oiseaux continueront à utiliser la zone du parc éolien si l'abondance en proie n'y est pas réduite (Robson, 2011). Dans ce cas, l'amélioration des habitats hors site est considérée comme une mesure de compensation, car elle ne réduit pas les risques de collision des rapaces, elle améliore seulement leur « qualité de vie » en dehors du parc (MEEM, 2016).

Photo 9 –
La création de placettes d'alimentation et de charniers attire nécessairement les vautours et autres charognards.



© Benjamin Vollot

Cette mesure doit donc aller de pair avec une diminution de l'attractivité du site éolien, qui passe par une réduction de l'abondance en proies pour les rapaces, pour espérer réduire le risque de collision.

Cette mesure suppose également que le territoire de repli soit libre afin d'éviter des conflits inter ou intra-spécifiques, en particulier entre les grands rapaces.

La création de milieux favorables est plus compliquée car très spécifique. L'ouverture des milieux (par défrichement ou abattage d'arbres) favorisera des rapaces comme l'aigle royal (Walker *et al.*, 2005) alors que ces boisements accueillent potentiellement d'autres oiseaux plus forestiers (Dorka *et al.*, 2014), mais aussi des gîtes à chiroptères (la pipistrelle de Nathusius est arboricole par exemple) et des zones de chasse.

Pour les chiroptères, l'expansion et la connectivité d'un réseau de haies dans un paysage bocager et la création de jachères ou de prairies permanentes permettent d'augmenter le nombre de corridors de déplacement et de zones de chasse (Millon *et al.*, 2015).

Le maintien des boisements mixtes ou de feuillus matures et des arbres sénescents ou morts (en forêt ou ailleurs) est aussi très important pour fournir le gîte et le couvert aux chauves-souris (Peste *et al.*, 2015).

La création de gîtes artificiels est une autre pratique reconnue mais ceux-ci ne doivent pas se substituer entièrement aux gîtes naturels, qu'il importe donc de conserver, voire de développer, toutes les espèces n'acceptant pas les gîtes artificiels (Mitchell-Jones, 2004 ; Peste *et al.*, 2015).

Restaurer ou créer un réseau de mares et d'étangs, et leur ripisylve associée, favorisera à la fois les amphibiens et les chiroptères en leur fournissant un site de reproduction, de chasse, et un abri contre les prédateurs (Peste *et al.*, 2015).

Bien qu'existantes, les pratiques restent spécifiques à chaque groupe, voire espèce. La création de milieux réclame donc une grande prudence et encore beaucoup de recherche afin de s'assurer de la mise en œuvre de bonnes pratiques (Gartman *et al.*, 2016b).

Effarouchement des animaux

Les techniques d'effarouchement et de répulsion des animaux sont nombreuses et varient sur deux paramètres :

- le système de détection de la cible : caméra, radar, etc. ;
- le type de signal : sonore, visuel, olfactif, etc.

Repérage des individus

Pour que l'effarouchement des animaux soit efficace et peu coûteux, il est nécessaire de disposer d'un système de détection automatisé, capable de détecter les oiseaux ou les chauves-souris en approche pour se déclencher, tout en évitant de s'activer pour autre chose (passage d'un avion, insectes, mouvement des nuages ou du vent dans les arbres).

Il existe plusieurs technologies d'acquisition, c'est-à-dire de repérage des animaux, comme les radars, utilisés depuis de nombreuses années, ou les systèmes optiques (caméras) qui sont devenus de plus en plus fiables et peuvent compter plusieurs spectres (infrarouge, vision nocturne) utilisables la nuit.

Dans tous les cas, ces systèmes doivent être installés sur les éoliennes ou à leur pied et être actifs 100 % du temps pour détecter à la fois les oiseaux diurnes et nocturnes ainsi que les chauves-souris.

Ces technologies de détection sont aussi utilisées pour stopper les éoliennes lorsqu'un oiseau ou chiroptère s'approche trop près d'une machine :

- *DTBird*, *ProBird*, *BirdSentinel* : des caméras « classiques » haute définition pour le jour, pouvant être couplées avec des caméras thermiques pour une surveillance 24 h/24, combinées avec un logiciel de reconnaissance d'image. Pour *DTBird* et *ProBird*, le programme de traitement peut ensuite déclencher des signaux sonores pour effrayer les oiseaux s'approchant, voire arrêter les éoliennes selon le paramétrage. Avec *DTBird*, un module supplémentaire permet d'enregistrer les collisions qui auraient lieu malgré l'utilisation des caméras, car la détection n'est pas efficace à 100 % (May *et al.*, 2012 ; Hanagasioglu *et al.*, 2015) ;
- *DTBat* : un système équivalent à *DTBird* utilisé pour détecter les chiroptères et stopper les éoliennes en cas de trop forte proximité. Il n'existe pas encore de solution d'effarouchement pour *DTBat* (Hanagasioglu *et al.*, 2015) ;
- *SafeWind* : basé sur le même principe que les précédents systèmes, à la différence qu'il combine à la fois la détection des chiroptères et celle de l'avifaune ;
- *Probat* : ce dispositif associe un suivi des conditions climatiques et de l'activité chiroptérologique sur site à un réseau de capteurs à l'échelle européenne permettant de détecter les flux migratoires pour ainsi mieux anticiper l'arrivée d'individus sur le parc et arrêter les machines ;
- TADS (pour *Thermal Animal Detection System*) : utilise des caméras à infrarouge (imagerie thermique) qui détectent des augmentations de température dans leur champ d'action, au pixel près. Malheureusement, les faux positifs sont très nombreux (Desholm *et al.*, 2006 ; Collier *et al.*, 2011) ;
- VARS (pour *Visual Automated Recording System*) : utilise des capteurs de proximité à infrarouge pour détecter la présence d'un oiseau ou d'une chauve-souris. Malheureusement, les pales et autres éléments en mouvement (comme les arbres bougeant avec le vent) ne doivent pas se situer dans le champ de vision des capteurs. (Collier *et al.*, 2011 ; Collier *et al.*, 2012) ;
- *Merlin Avian Radar Systems* : un radar couplé à un logiciel (Merlin SCADA) pouvant déclencher des actions préprogrammées, capable d'opérer pour une seule machine ou un parc entier, de jour comme de nuit. Il n'est par contre pas capable de différencier un gros individu de plusieurs petits individus volant en groupe, ou de différencier oiseaux et chiroptères (Collier *et al.*, 2011) ;
- ATOM (pour *Acoustic/Thermographic Offshore Monitoring System*) : des caméras classiques et à infrarouge (imagerie thermique) sont cette fois couplées à des microphones enregistrant à la fois dans le domaine audible et dans les ultrasons pour détecter les chiroptères. Ce système est même capable d'identifier les espèces d'oiseaux s'il capture des images et des sons des individus (Collier *et al.*, 2011 ; Willmott *et al.*, 2015).
- Système GPS (*Global Positioning System*) : des balises GPS peuvent être posées sur des individus pour suivre leurs mouvements et ainsi prévoir un potentiel risque de collision, pour ensuite déclencher une réponse appropriée. En phase d'exploitation, cette technologie, qui nécessite la capture des individus, n'est utilisée que pour des espèces patrimoniales dont les individus évoluant sur le site sont clairement identifiés (May *et al.*, 2012 ; Sutter *et al.*, 2012 ; Sheppard *et al.*, 2014).



© Claude Labrie

L'installation de systèmes spéciaux sur les éoliennes ou à leur pied permet de détecter les animaux en approche, ce qui facilite leur suivi.

Dissuasion acoustique

Les dispositifs d'effarouchement sonores pour les oiseaux sont très nombreux, car utilisés depuis des années pour l'agriculture ou dans les aéroports, et montrent une efficacité variable selon les techniques utilisées. Dans tous les cas, la plupart de ces moyens ne sont pas viables sur le long terme en raison d'une accoutumance plus ou moins rapide de l'avifaune (Dooling, 2002 ; Bishop *et al.*, 2003, Soldatini *et al.*, 2007).

Seuls les dispositifs de type bioacoustique, c'est-à-dire l'émission de cris d'alarme ou de détresse d'oiseaux, montrent des résultats légèrement supérieurs avec un temps d'habituation plus long (Gilsdorf *et al.*, 2002 ; Bishop *et al.*, 2003).

Les émissions de cris de rapaces pour effrayer d'autres espèces d'oiseaux ne sont pas nécessairement efficaces, car cela ne correspond pas à une situation de danger habituelle pour ces oiseaux : les rapaces chassent en silence (Bishop *et al.*, 2003).

Les dispositifs à ultrasons ont un temps été proposés, notamment pour leur absence de nuisance sonore envers l'homme, mais comme ce dernier, la majorité des oiseaux ne perçoivent pas les ultrasons (Dooling, 2002 ; Gilsdorf *et al.*, 2002). Ces appareils sont donc inutiles pour repousser l'avifaune (Bishop *et al.*, 2003).

S'ils ne sont pas associés à un véritable « plan de gestion » du site visant à le rendre moins attractif tout en s'assurant d'une solution de repli à proximité pour les espèces cibles, ces dispositifs n'auront qu'une efficacité très limitée dans le temps.

Bien qu'inefficaces sur les oiseaux, les ultrasons semblent être un bon répulsif pour les chiroptères. En effet, plusieurs études ont démontré que l'émission d'ultrasons perturbait les chauves-souris et les forçait à éviter la zone, car cela brouille leur propre système d'écholocation, basé sur la production d'ultrasons (Spanjer, 2006 ; Horn *et al.*, 2008a ; Szewczak & Arnett, 2008 ; Johnson *et al.*, 2012 ; Arnett *et al.*, 2013b).

Pour améliorer l'efficacité du dispositif (les chauves-souris étant capables de moduler leur fréquence d'émission), il est conseillé de diffuser en permanence des signaux à différentes fréquences et selon une durée, une intensité et un rythme irréguliers sur lesquels les chiroptères ne pourront pas caler leurs propres ultrasons (Spanjer, 2006 ; Johnson *et al.*, 2012).

Ainsi, ces animaux se retrouvent incapables d'utiliser l'écholocation dans un environnement déjà saturé en ultrasons, et montrent des comportements de fuite, puis d'évitement. En effet, même si la portée des ultrasons produits par les appareils actuels ne dépasse pas les 15 m, les chauves-souris sont capables de détecter la zone affectée de bien plus loin (Szewczak & Arnett, 2008).

Il est possible que sur le long terme, les chauves-souris finissent par éviter toutes les éoliennes après avoir expérimenté les répulsifs à ultrasons sur certaines d'entre elles (Szewczak & Arnett, 2008). En effet, elles ne semblent pas montrer d'habituation face à ce genre de dispositif (Szewczak & Arnett, 2008).

Enfin, et comme dit précédemment, la portée des brouilleurs n'est que d'une quinzaine de mètres, ce qui est bien inférieur au diamètre de la zone balayée par les éoliennes. La dispersion des ultrasons est bien moins efficace quand l'air est chargé d'humidité. Il est donc nécessaire de développer un appareil capable d'émettre des ultrasons à une portée supérieure à celle des pales (Arnett *et al.*, 2013b).

Effarouchement visuel

Des méthodes visuelles sont aussi disponibles pour éviter que l'avifaune ou les chiroptères ne s'approchent trop près des éoliennes. Beaucoup ont été inventées et utilisées pour la protection des cultures ou pour la sécurité sur les aéroports où leur efficacité est

très variable (Bishop *et al.*, 2003, Bridges *et al.*, 2004, Soldatini *et al.*, 2007). Tous ces dispositifs ne sont toutefois pas applicables à la problématique éolienne, en particulier ceux qui ont pour but d'effaroucher des groupes d'oiseaux posés au sol (laser, lumières clignotantes, stroboscopiques ou rotatives, etc.). Le dispositif *AirBird*, qui semble faire ses preuves en conditions aéroportuaires (Giordano, 2017), est en voie de déploiement sur des parcs éoliens français afin d'en tester l'efficacité dans cet autre contexte.

En termes de perception des rayonnements ultraviolets (UV), les oiseaux peuvent être classés en deux groupes suivant leurs longueurs d'ondes d'absorption maximale :

- VS (*violet sensitive*, de 402 à 420 nm) : la plupart des espèces, dont les rapaces, sont VS. L'aigle royal et la buse variable ne perçoivent presque pas les UV par exemple (Lind *et al.*, 2013 ; Doyle *et al.*, 2014) ;
- UVS (*ultraviolet sensitive*, de 355 à 380 nm) : les perroquets, les mouettes et de nombreux passereaux se trouvent dans ce groupe (Ödeen & Håstad, 2013).

May *et al.* (2015) proposent ainsi des lasers émettant dans le domaine des UV pour effaroucher les oiseaux approchant les éoliennes de nuit, sachant que les passereaux migrateurs – souvent victimes de collisions nocturnes – en feront partie. Dans une étude plus récente, May *et al.*, (2017a) ont montré que les oiseaux réagissaient partiellement et de façon limitée à la présence d'éclairages UV mais concluent à la pertinence de développer un dispositif de dissuasion visuelle basée sur ce principe pour certaines espèces.

L'utilisation de miroirs et autres surfaces réfléchissantes a aussi montré une certaine efficacité, notamment chez les rapaces, les anatidés, les laridés (mouettes et goélands) et plusieurs espèces d'ardéidés (hérons). Cette technique ne fonctionne que de jour puisqu'il faut une source de lumière à réfléchir, et nécessite donc des méthodes complémentaires pour la nuit ou les périodes sans soleil (Bishop *et al.*, 2003).

Autres approches

D'autres types de répulsifs ont été testés pour limiter la présence d'oiseaux ou de chauves-souris :

- l'usage de répulsifs chimiques montre des résultats intéressants en laboratoire mais leur application sur le terrain est beaucoup moins efficace et plus coûteuse car une application régulière des produits est nécessaire (Bishop *et al.*, 2003) ;
- les champs électromagnétiques ont un temps été considérés pour repousser les chiroptères (Nicholls & Racey, 2007 & 2009), mais les risques de santé associés sur la faune et sur l'homme ont fait que cette solution a rapidement été abandonnée (Voigt *et al.*, 2015) ;
- les épouvantails, cadavres, cerfs-volants, qui font l'objet d'une habitude rapide (Bishop *et al.*, 2003).

Aucune méthode n'étant parfaite, l'utilisation combinée de plusieurs dispositifs d'effarouchement, à la fois auditif et visuel, est plus efficace et l'habitude plus lente que l'usage séparé de différentes techniques (Bishop *et al.*, 2003, Soldatini *et al.*, 2007).

Enfin, il est important de préciser que la plupart des techniques n'ont pas été testées pour des parcs éoliens, voire pas testées du tout (Bridges *et al.*, 2004 ; Gartman *et al.*, 2016b).

Asservissement des machines

Selon Arnett *et al.* (2013c) et May *et al.* (2015), le bridage des machines est à ce jour le moyen opérationnel le plus efficace pour limiter les collisions des chauves-souris avec les éoliennes. De plus, cette méthode est peu coûteuse, facile à mettre en place et n'est pas sujette à l'habitude, contrairement aux répulsifs.

L'asservissement d'une machine peut être effectué de deux façons :

- la présence d'un individu (oiseau ou chiroptère) à proximité de l'éolienne entraîne un arrêt de celle-ci ;
- la mise en route et l'arrêt de la machine sont régis par les conditions environnementales : heure, période de l'année, conditions météorologiques (vitesse du vent, température, humidité, etc.).

Pour les chiroptères

Arrêt après détection des individus

Les dernières années ont vu apparaître des technologies permettant de détecter la présence de chauves-souris à proximité d'une éolienne, qui sont basées sur l'utilisation de caméras multi-spectres ou de microphones à ultrasons (voir p. 76, Repérage des individus).

Une fois un individu détecté, le logiciel de gestion peut soit déclencher un dispositif de dissuasion (voir p. 76, Effarouchement des animaux) soit stopper l'éolienne. Aucune collision entre une chauve-souris et une machine à l'arrêt n'ayant été observée à l'heure actuelle, il est attendu que la coupure du rotor réduise le risque de collision à néant.

Les limites de cette technologie reposent sur la capacité de détection et d'identification des individus de la part des caméras et logiciels associés, qui peut entraîner des faux positifs ou faux négatifs (May *et al.*, 2012 ; Hanagasioglu *et al.*, 2015) et sur le temps nécessaire pour mettre à l'arrêt les éoliennes. Toutefois, ces capacités s'améliorent d'année en année et sont donc de plus en plus fiables.

Bridage selon les paramètres environnementaux

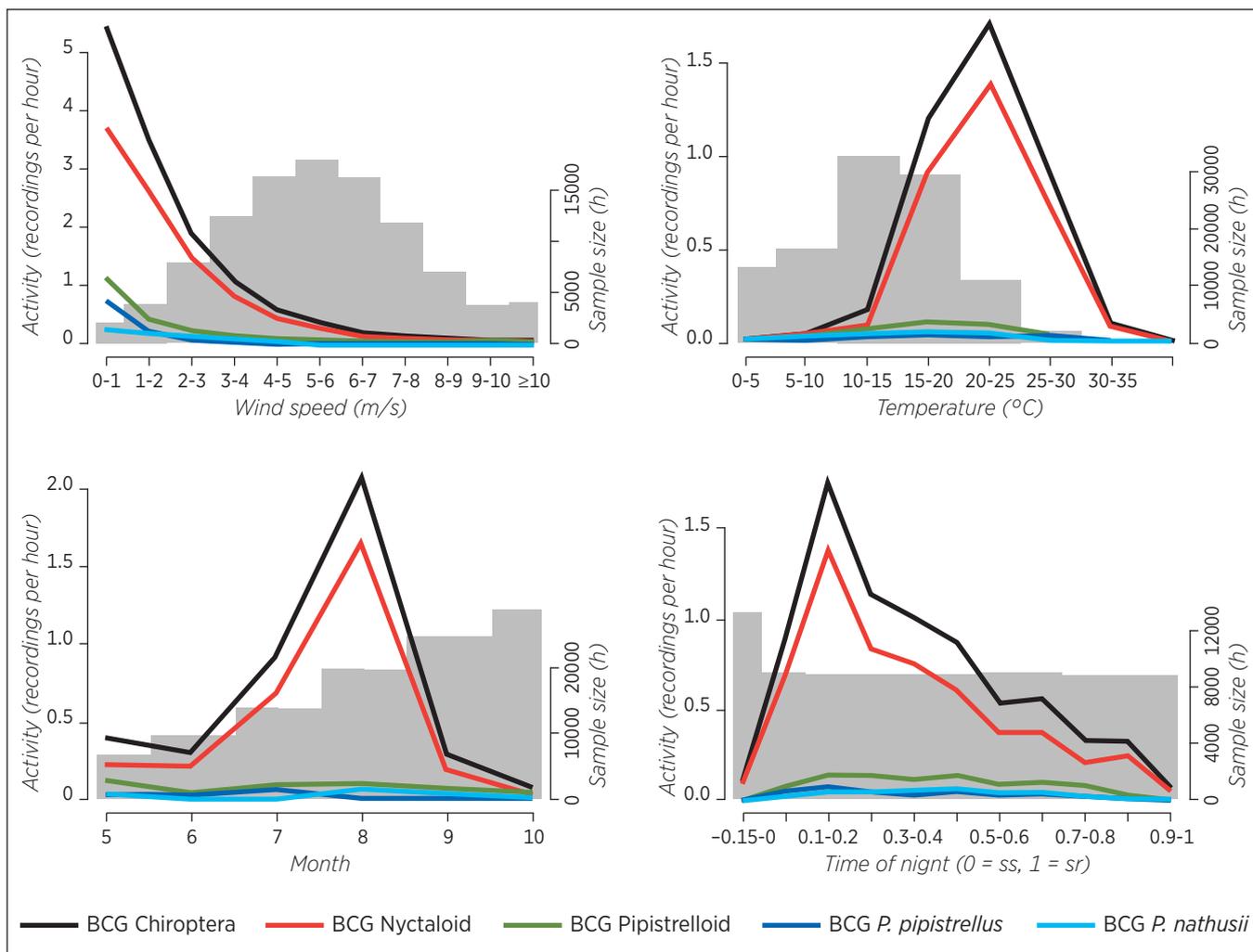
L'efficacité de la deuxième technique pour diminuer les risques de collision des chauves-souris a été prouvée de nombreuses fois (Arnett *et al.*, 2009 ; Baerwald & Barclay, 2009 ; Arnett *et al.*, 2011 ; Brinkmann *et al.*, 2011 ; Good *et al.*, 2011 ; Good *et al.*, 2012 ; Arnett *et al.*, 2013c ; Good *et al.*, 2013 ; Hein, 2014 ; Martin, 2015 ; Good *et al.*, 2016 ; Behr *et al.*, 2017).

En effet, l'activité des chiroptères est fortement dépendante de paramètres climatiques et temporels qui permettent de prédire les périodes où le risque de collision est le plus élevé (Erickson & West, 2002 ; Arnett, 2005 ; Cryan & Brown, 2007 ; Giovanello & Kaplan, 2008 ; Rydell *et al.*, 2010a ; Arnett *et al.*, 2011 ; Hein, 2014 ; Schuster *et al.*, 2015).

Les principaux facteurs influençant l'activité de ce taxon sont les suivants (**figure 16**) :

- l'heure : les chauves-souris ne sont actives que la nuit, avec un pic durant les premières heures puis une diminution jusqu'à l'aube ;
- la saison : il y a un pic d'activité pendant l'été jusqu'au début de l'automne (fin juillet jusqu'à fin septembre) lié à la reproduction et à la migration des individus en Amérique du Nord et dans le nord-ouest de l'Europe (Johnson *et al.*, 2011). Dans le sud-est, le pic a lieu plus tôt (Georgiakakis *et al.*, 2012) ;
- la vitesse du vent : il a été montré que les chiroptères étaient plus actifs lorsque le vent était faible, et qu'au-delà de 5-6 m/s, leur activité diminuait fortement ;
- la température : les chauves-souris sont plus actives avec des températures supérieures à 8-10 °C ;
- le taux d'humidité : des précipitations ou un brouillard trop important diminuent la sortie des insectes dont les chiroptères se nourrissent (Zahn *et al.*, 2007) ;
- peuvent aussi être citées la couverture nuageuse, qui favorise l'activité, et la phase lunaire qui favorise elle aussi l'activité quand la lumière est faible (Silva, 2009).

Figure 16 – Activité des chiroptères en fonction de différents paramètres environnementaux
(d'après Behr *et al.*, 2017)



L'utilisation de ces paramètres pour reprogrammer les éoliennes permet de diminuer les risques de collision.

Le seuil de démarrage des machines, c'est-à-dire la vitesse minimale du vent pour qu'une éolienne produise de l'électricité, est compris entre 3 et 4 m/s sur la plupart des modèles. Il est possible de modifier ce seuil de manière à ce que les éoliennes ne commencent à tourner qu'à partir de 5 ou 6 m/s. En effet, c'est à partir de cette vitesse que l'activité chiroptérologique connaît une baisse significative, qui continue avec l'augmentation de la vitesse (**figure 17, page 83**; Voigt *et al.*, 2015).

De cette façon, les éoliennes ne tournent plus durant les périodes de forte activité des chauves-souris, ce qui permet de diminuer fortement leur mortalité de 57 % à 93 %, avec un seuil entre 5 et 6 m/s (Baerwald *et al.*, 2010 ; Arnett *et al.*, 2011).

L'ajustement de l'angle d'attaque des pales et de l'orientation de la nacelle par rapport au vent est un autre moyen de diminuer les risques. En effet, même si une éolienne ne produit d'électricité qu'à partir de 3 ou 4 m/s, les pales sont capables de tourner à des vitesses de vent inférieures, ce qui peut être source de collisions (Hein, 2014).

Il est donc nécessaire d'éviter cette mise en route intempestive des machines en réglant au minimum ou au maximum l'angle d'attaque des pales pour que le vent ne les entraîne pas, ou en faisant pivoter la nacelle pour que les pales ne soient plus face au vent. Ce réglage doit être actif jusqu'à la vitesse de démarrage des éoliennes afin que celles-ci ne

se mettent à tourner que pour produire de l'électricité (Hein, 2014). Cette modification n'induit aucune perte de production et permet même de diminuer l'usure de la machine (Baerwald & Barclay, 2009).

En Amérique du Nord, seule la vitesse du vent est utilisée comme paramètre pour contrôler les machines et la valeur semble fixée de manière arbitraire (Weller & Baldwin, 2012 ; Arnett *et al.*, 2013a ; Behr *et al.*, 2017). En Europe, et notamment en Allemagne, d'autres facteurs comme l'heure, la saison et la température sont intégrés en plus du vent dans les logiciels utilisés pour le contrôle des éoliennes. Cela permet notamment d'affiner et de diminuer les périodes d'arrêt des machines et ainsi de réduire les pertes financières induites. Les algorithmes de calcul utilisés pour ce bridage permettent même de définir ces périodes de fonctionnement à partir d'une valeur de mortalité, c'est-à-dire d'un nombre de cadavres attendus (Behr *et al.*, 2014, 2015 & 2017).

Ce bridage plus précis est maintenant la méthode standard en Allemagne pour réduire les collisions en phase de fonctionnement. De plus, plusieurs *Länder* ont même rendu obligatoire l'instauration d'un seuil de mortalité allant d'une à deux chauves-souris au maximum par an et par turbine (Behr *et al.*, 2017).

D'un point de vue technique, la mise en place d'un tel asservissement doit être faite parc par parc, voire machine par machine. En effet, les espèces présentes, leur activité mais aussi la météorologie, le relief, etc. sont différents d'un site à l'autre (Erickson & West, 2002 ; Arnett *et al.*, 2011 ; Rodrigues *et al.*, 2015 ; Beucher *et al.*, 2018).

Dans tous les cas, un suivi de l'activité acoustique à hauteur de pales est nécessaire pendant les premières années de fonctionnement du parc, qui permet de définir un seuil de démarrage adapté au parc et à l'activité chiroptérologique du site. Un tel suivi est imposé par le Protocole de suivi environnemental des parcs éoliens terrestres validé par le MTES en 2018.

En Allemagne, où le bridage des machines est devenu la première méthode opérationnelle de réduction des impacts, ce suivi dure deux ans. Lors de la première année, où aucune donnée n'est disponible, un bridage général est mis en place avec un seuil aux alentours de 6 m/s pour le vent, une température supérieure à 10 °C et une coupure dans les premières heures de la nuit (Behr *et al.*, 2017).

Après un an de suivis acoustique et météorologique, un nouveau bridage est défini à partir des données récoltées. Au début de la troisième année d'exploitation, la valeur seuil est déterminée à partir des deux années de suivi acoustique du parc, ce qui permet de limiter en partie la variabilité interannuelle (Behr *et al.*, 2017).

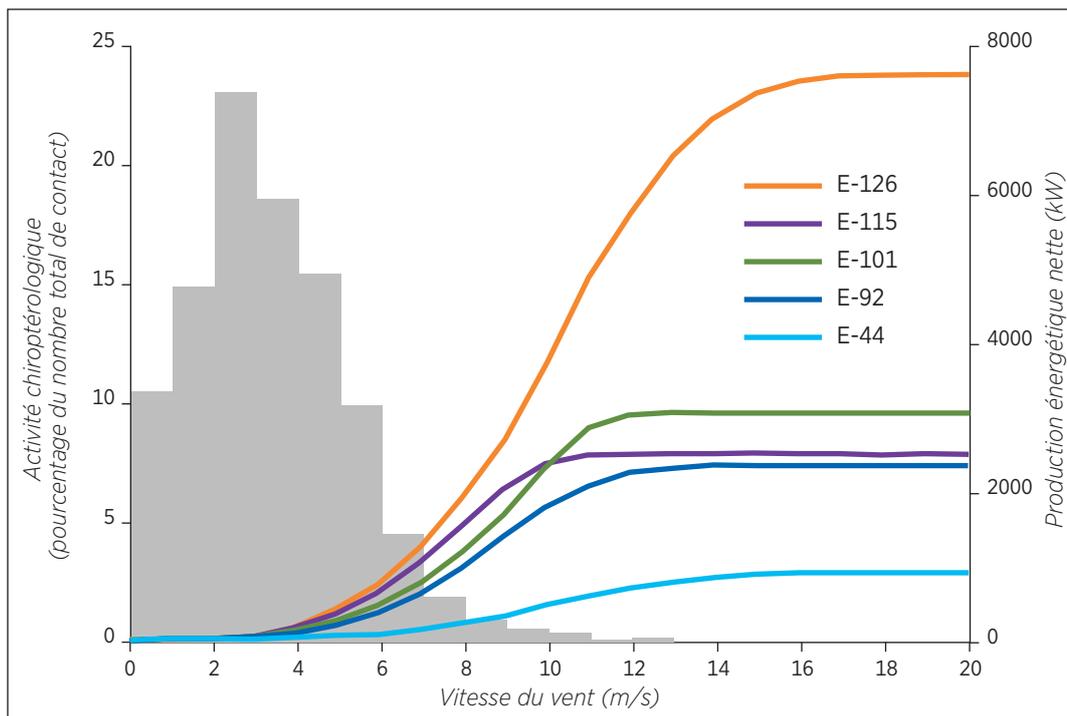
Limites du bridage pour les chiroptères

Devant cette méthode qui semble efficace pour diminuer les collisions, une question mérite toutefois d'être posée : quel taux de mortalité est acceptable ? En effet, grâce à l'algorithme développé par Brinkmann *et al.* (2011) et utilisé en Allemagne, il est possible de choisir, par machine, un taux de mortalité – donc un nombre de cadavres – annuel qui définira ensuite les paramètres du bridage, ce taux variant entre un et deux cadavres selon les *Länder* (Behr *et al.*, 2017).

Toutefois, fixer un taux de façon arbitraire pose deux problèmes supplémentaires :

- cela revient à accepter la mortalité d'individus appartenant à des espèces protégées dans l'Union européenne par plusieurs textes (Convention de Berne, Convention de Bonn, directives Habitats Faune-Flore). De plus, même si un taux de deux chauves-souris tuées par an et par éolienne est accepté, il ne peut être valable dans le temps. En effet, l'expansion du parc éolien européen d'un côté, et la taille limitée des populations de chiroptères – souvent en déclin – de l'autre, ne peuvent rendre cette

Figure 17 – Superposition de l'activité chiroptérologique en hauteur et de la production énergétique nette de plusieurs modèles d'éoliennes (44 à 126 m de hauteur de nacelle) en fonction de la vitesse du vent d'avril à octobre 2011 et 2012 (Voigt *et al.*, 2015)



politique viable (Voigt *et al.*, 2015) si d'autres pressions anthropiques qui s'exercent sur les populations de chiroptères ne sont pas réduites par ailleurs ;

- les nouvelles éoliennes sont capables de produire de plus en plus d'énergie avec des vitesses de vent de plus en plus faibles, ce qui va nécessairement poser problème pour un asservissement des machines qui se base principalement – mais pas entièrement – sur la vitesse du vent, et qui augmentera donc les pertes financières et les risques de conflit entre développeurs éoliens et écologistes (**figure 17** ; Voigt *et al.*, 2015).

À côté de cette nécessaire réflexion face à la mise en place de seuils de mortalité, il est important de rappeler que le bridage par vitesse de démarrage ou par algorithme n'est pas parfait. En effet, il a notamment été montré que des chauves-souris, principalement des espèces migratrices, pouvaient voler à des vitesses de vent supérieures à 6-7 m/s, qui correspondent aux seuils de démarrage habituels des machines bridées. Un risque de mortalité existe donc toujours (Voigt *et al.*, 2015).

De plus, les algorithmes utilisés en Allemagne ont été développés pour ce pays seulement, pour un certain type d'habitats et d'éoliennes (Voigt *et al.*, 2015). Un travail important est donc nécessaire pour développer ce genre d'outils dans toute l'Europe, avec sa diversité d'habitats, d'espèces et sa variété d'éoliennes concernées.

Plus généralement, il faut garder en tête que même si la mise en place de mesures d'atténuation peut sembler efficace à l'échelle d'un parc éolien, avec une forte diminution du nombre de cadavres retrouvés par exemple, il n'est pas certain que, ramené à l'échelle continentale, cela soit suffisant pour endiguer le déclin de certaines espèces. En effet, les connaissances sur les populations de chiroptères européens et leur démographie, ainsi que sur l'impact de l'éolien sur ces populations, restent faibles pour le moment (Arnett *et al.*, 2011 ; Voigt *et al.*, 2015).

Pour l'avifaune

Bien que l'activité des oiseaux soit moins dépendante de la météorologie que celle des chiroptères, il est toutefois possible de prédire certains événements, comme les migrations ou les déplacements locaux pour certaines espèces, pour les anticiper et couper les machines lors des périodes à haut risque (Piorkowski *et al.*, 2012 ; Birdlife International, 2015 ; Singh *et al.*, 2015). De plus, il est aussi possible d'arrêter les éoliennes à l'approche d'un individu, grâce à des détecteurs de proximité (Willmott *et al.*, 2015 ; Saraiva *et al.*, 2017).

Migrateurs

Le risque de collision est particulièrement élevé en période de migration en raison de l'importance des flux d'oiseaux et celui-ci est fortement influencé par conditions météorologiques. Les paramètres de la zone de départ conditionnent la densité de la migration, alors que l'altitude de vol est affectée par les paramètres locaux (Lack, 1963 ; Alerstam *et al.*, 1973 ; Alerstam, 1990 ; Bruderer *et al.*, 1995 et Erni *et al.*, 2002 dans Hüppop *et al.*, 2006 ; Thomas *et al.*, 2011 ; Fijn *et al.*, 2015).

Ces deux variables « densité » et « altitude », sont prévisibles et pourraient permettre d'identifier des périodes de risque grâce à une surveillance de la météo. Toutefois, devant les distances parcourues et le nombre de pays traversés par les individus migrants, une coopération à l'échelle continentale est indispensable (Liechti *et al.*, 2013). En Europe, le réseau des radars météorologiques est tout désigné pour cette tâche et permet un suivi en temps réel des migrations (Dokter *et al.*, 2010).

Ce réseau de surveillance européen constitue en soi un très bon outil pour les développeurs éoliens et leur permettrait, lors des phases de recherche de sites favorables, de repérer rapidement les voies de migration de l'avifaune.

Avec cette méthode de surveillance, prédire les périodes à haut risque de collision devient plus aisé. Les nuits où les conditions météorologiques sont défavorables et qu'une forte migration est attendue sont le parfait exemple de moment à risque élevé (Hüppop *et al.*, 2006).



© NaturAllies

Martinet noir *Apus apus*, espèce fortement impactée en période de migration.

migration forte, effets qui ne sont pas connus actuellement pour la plupart des espèces migratrices européennes (Liechti *et al.*, 2013).

La notion est similaire à celle du seuil de démarrage des machines régi par la vitesse du vent ou par d'autres variables (voir p. 80, Pour les chiroptères et p. 82, Limites du bridage pour les chiroptères).

L'arrêt des machines lorsque des oiseaux vont passer sur le site ou à proximité est alors une solution simple et efficace pour réduire le risque de collision (Manville II, 2005), même si l'infrastructure en elle-même constituera toujours un obstacle dans l'espace aérien.

Une des principales difficultés tient à la définition d'une migration forte, c'est-à-dire d'une haute densité d'oiseaux en déplacement, pour se considérer en phase à risque fort de mortalité.

Ceci amène une réflexion qui se rapproche de celle concernant le bridage et ses limites pour les chiroptères : il est nécessaire de connaître les effets de la mortalité éolienne sur les populations d'oiseaux et leur démographie pour pouvoir définir ce seuil de

Dans l'attente de données sur les effets de la mortalité sur les populations d'oiseaux, il est proposé un taux de mortalité « acceptable » qui lui non plus ne peut pas convenir d'un point de vue juridique ou écologique (Voigt *et al.*, 2015). Liechti *et al.* (2013) proposent une mortalité acceptable d'environ deux ordres de magnitude sous la mortalité provoquée par les structures humaines hautes (lignes à haute tension, tours et mâts, buildings, etc.). Cela donne une moyenne « tolérable » (selon ces auteurs) de 10 oiseaux tués par an et par éolienne, mais ce chiffre n'a pas réellement de sens, notamment parce qu'il ne prend pas en compte la diversité des espèces potentiellement impactées et notamment celles comptant peu d'individus et pour lesquelles la perte de quelques spécimens est suffisante pour mettre en péril la population. Une étude spécifique par site est toujours nécessaire pour éviter un emploi inapproprié de mesures ou de valeurs « générales » (Liechti *et al.*, 2013), surtout si des espèces à intérêt patrimonial sont présentes.

Grands rapaces

Sutter *et al.* (2012) et Sheppard *et al.* (2014) ont mis au point des systèmes de suivi et de surveillance par télémétrie permettant aux gestionnaires de parcs éoliens d'être alertés par SMS quand un condor de Californie équipé d'un boîtier GPS entre dans le périmètre du parc. Un délai important – plus de deux heures – leur permet ensuite de confirmer visuellement la présence d'un individu puis de mettre à l'arrêt les éoliennes à proximité si nécessaire.

Cette méthode nécessite toutefois de capturer et d'équiper les oiseaux avec les boîtiers, ne fonctionne que le jour (la batterie de la balise étant alimentée par un panneau solaire) et ne convient que pour les espèces de grande taille dont le nombre évolue peu avec le temps (Sheppard *et al.*, 2014).

À l'avenir, ce système de détection pourra être couplé avec des mesures d'arrêt automatique des machines (ne nécessitant donc plus la présence d'un observateur pour couper les éoliennes) ou de dissuasion, comme un générateur de vibrations intégré au boîtier fixé sur les oiseaux (Sheppard *et al.*, 2014). Il permettra à terme d'éviter la surveillance quasi permanente du parc par un observateur formé, et donc de réduire les coûts pour le développeur (de Lucas *et al.*, 2012).

Son utilité peut aussi se révéler en phase d'étude environnementale puisqu'il permettrait de connaître l'usage du site par les rapaces. Une miniaturisation de l'équipement et une diminution du coût permettraient aussi de généraliser son utilisation pour d'autres taxons comme les chiroptères, et notamment les espèces migratrices (Sutter *et al.*, 2012).



Les grands rapaces, comme le vautour fauve *Gyps fulvus*, peuvent être équipés de balises pour détecter leur approche des éoliennes et déclencher leur mise à l'arrêt.

Pour les nombreux oiseaux non équipés de balise, plusieurs systèmes de détection utilisant des caméras ou des radars ont été mis au point, permettant de déclencher des systèmes d'effarouchement ou l'arrêt des éoliennes.

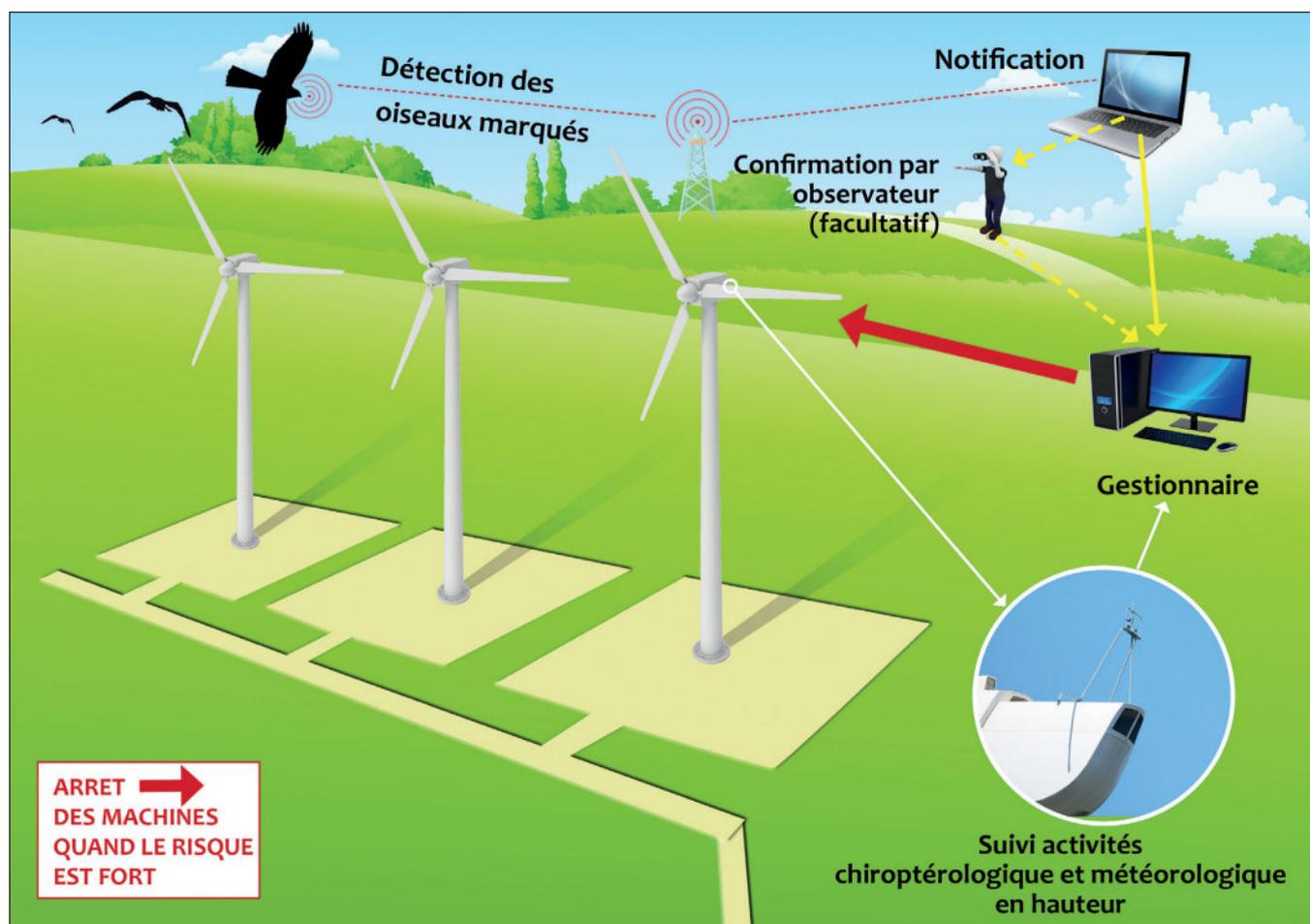
Le système d'arrêt sur demande assisté par radar (RASOD) utilisé par Tomé *et al.* (2017), qui consiste en une équipe d'observateurs et en un radar, a notamment permis de réduire à zéro la mortalité sur un parc éolien au Portugal. Ce résultat impressionnant est dû à la présence d'observateurs humains sur le site, permettant d'éviter à la fois les faux négatifs et faux positifs, c'est-à-dire d'arrêter la machine seulement quand un oiseau s'approche, mais pour 100 % des occurrences de cet événement.

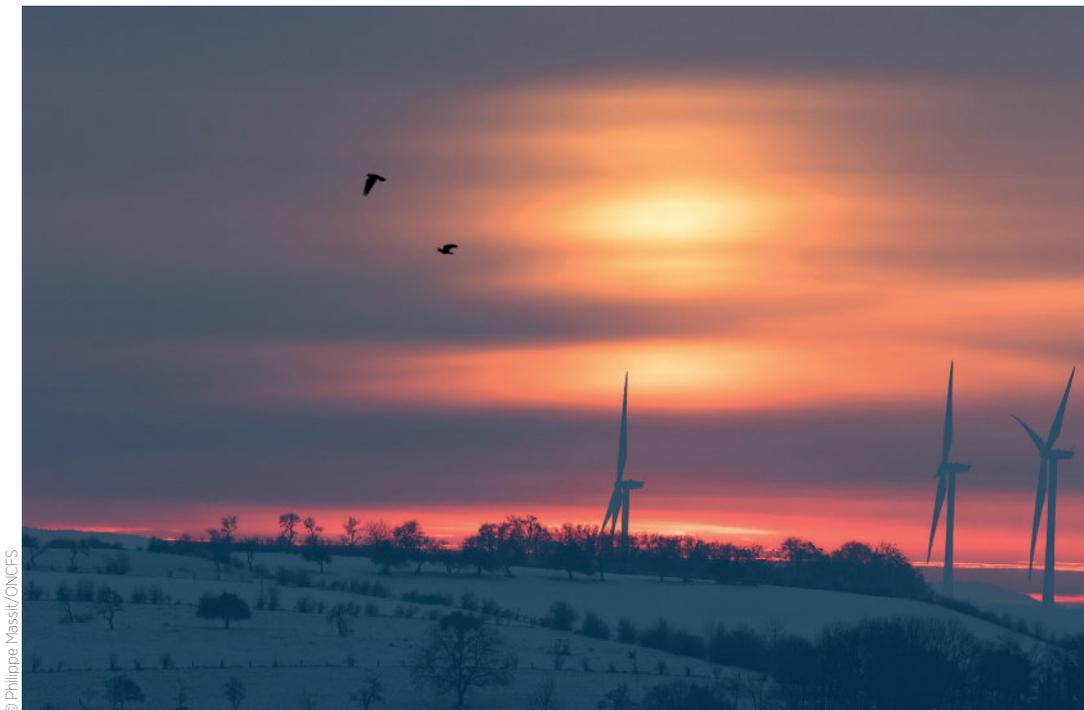
Ce n'est pas le cas pour des systèmes de détection automatique qui peuvent provoquer l'arrêt d'une éolienne alors qu'aucun oiseau n'est proche (lors du passage d'un avion par exemple), ou au contraire ne pas couper la machine alors qu'un individu est tout près, notamment avec des espèces de petite taille (Hanagasioglu *et al.*, 2015).

Ce genre de technologie automatisée, bien que prometteuse, nécessite donc encore des améliorations et des tests (May *et al.*, 2012 ; Hanagasioglu *et al.*, 2015 ; Gartman *et al.*, 2016b).

D'autres technologies, peu ou pas testées, existent et peuvent représenter un potentiel : célomètres, capteurs de pression, lasers, surveillances vidéos, etc. (Desholm *et al.*, 2006) ; (**figure 18**).

Figure 18 – Méthodes d'asservissement des machines pour limiter les collisions avec l'avifaune et les chiroptères
(Source : ONCFS)





L'asservissement des éoliennes, leur bridage, les études préalables correctement menées et une stratégie à large échelle permettent de limiter les impacts de cette source d'énergie peu polluante.

3.2.4.4 Mesures pour extension et renouvellement

L'extension d'un parc se fait simplement par l'installation de nouvelles machines sur le même site, alors que le renouvellement (*repowering*) est le nom utilisé pour désigner le remplacement des machines d'un parc par des éoliennes plus récentes et parfois plus puissantes, notamment quand les premières sont en fin de vie.

Ce renouvellement de la puissance installée du parc éolien doit toutefois être encadré, en raison de nouveaux impacts négatifs possibles sur l'environnement. À l'heure actuelle, le renouvellement des parcs éoliens fait l'objet d'une instruction¹ ministérielle qui offre des lignes directrices aux préfets pour déterminer ce qui constitue des modifications notables ou substantielles.

Ce document rappelle qu'une nouvelle demande d'autorisation unique n'est nécessaire que lorsque le parc est l'objet de modifications substantielles, avec notamment des changements dans les emplacements des mâts ou dans les dimensions des machines. Une étude d'impact différentielle sera alors nécessaire afin d'évaluer les potentiels impacts supplémentaires entre le parc existant et le nouveau projet. Au contraire, aucune autorisation ou étude n'est obligatoire si la localisation, le nombre de machines et leurs mensurations restent similaires (cas où seule la puissance des machines augmente, on parle alors de *revamping* ou remontage) et si le suivi environnemental réalisé dans les trois années qui précèdent la demande de renouvellement a démontré l'absence d'impact significatif.

C'est donc dans le cas d'un remodelage complet du parc que des impacts supplémentaires peuvent apparaître. En effet, comme indiqué dans le paragraphe 3.2.4.1., les caractéristiques des machines ou des changements sur la machine, comme l'augmentation de la hauteur du mât, peuvent avoir une influence sur le risque de collision avec l'avifaune ou les chiroptères.

L'emplacement des mâts sur un site découle de l'étude d'impact qui a identifié les zones de moindre impact ; tout déplacement d'une ou plusieurs éoliennes devrait donc être évité

1. Instruction du gouvernement du 11 juillet 2018 relative à l'appréciation des projets de renouvellement des parcs éoliens terrestres.

au risque d'augmenter les impacts sur les habitats ou la faune volante. Dans le cas de parcs éoliens ayant été développés sans prise en compte réelle et sérieuse des enjeux de biodiversité, ou lorsque ces enjeux auront évolué avec le temps, le renouvellement du parc peut être une opportunité de réduire ces impacts en déplaçant une ou plusieurs éoliennes.

De plus, si le renouvellement arrive en fin de vie du parc, c'est-à-dire au bout d'une vingtaine d'années, les données de l'étude d'impact ne peuvent pas être considérées comme actuelles, c'est pourquoi un suivi environnemental est imposé dans les trois années qui précèdent la demande de renouvellement.

Lors de la conduite d'un projet de renouvellement, il est donc indispensable de prendre en compte ces changements afin d'évaluer au mieux les nouveaux impacts. Il est ensuite possible de proposer des méthodes d'atténuation, comme limiter la hauteur des mâts et le diamètre des pales s'il y a des enjeux chiroptérologiques (Barclay *et al.*, 2007 ; Arnett *et al.*, 2008). Réduire le nombre de mâts en installant des machines plus puissantes individuellement pour une puissance « collective » du parc éolien similaire permet de réduire les impacts sur les oiseaux (Smallwood & Neher, 2004 ; Smallwood & Karas, 2009).

Le simple remplacement des machines par d'autres plus puissantes, tout en conservant les mêmes emplacements et des dimensions similaires, reste toutefois une opportunité pour l'exploitant de mettre en place de nouvelles techniques de réduction des impacts (diminuer l'éclairage, bridages, etc.).

L'extension d'un parc devrait suivre un procédé similaire : l'ajout de machines obligerait à réaliser une nouvelle étude d'impact. Dans le cas d'un faible nombre d'éoliennes supplémentaires, en connexion directe avec le parc existant, les données existantes peuvent servir de base à la réalisation de l'étude d'impact et l'effort d'expertise à produire peut être ajusté à cette situation particulière : seuls quelques inventaires complémentaires peuvent être nécessaires, à la condition que l'exploitant dispose de données récentes (obtenues par exemple dans le cadre de suivis post-implantation) et qu'il n'y ait pas eu de modifications significatives des impacts cumulés (MEEM, 2016).

3.2.4.5 Mesures en phase de démantèlement

Lors de cette phase, appliquer à nouveau les mesures d'atténuation prises lors de la phase de chantier est une simple preuve de bon sens. Cela permet de limiter la dégradation du milieu, les pollutions ou les collisions avec la faune (MEEM, 2016).

De plus, l'objectif étant de retrouver un site vierge, tout indice de présence humaine doit être éliminé autant que faire se peut, comme les gravats, les voies d'accès (sauf indication contraire du propriétaire du terrain) et les fondations en béton sur une profondeur allant de 1 à 2 m minimum selon la nature du terrain (MEDDTL, 2011).

Une restauration écologique du site peut être nécessaire pour aider le milieu à retrouver son état pré-construction.

La durée de vie des machines étant d'environ 20 ans (Nugent & Sovacool, 2014 *in* Gartman *et al.*, 2016b), les premiers démantèlements ont démarré il y a quelques années déjà (en France : 2010 pour le premier démantèlement d'une fondation d'éolienne). Toutefois, il n'existe pas de recherche sur le sujet à l'heure actuelle (Ferrell & DeVuyst, 2013).

D'un point de vue réglementaire, l'obligation de fournir, au moment de l'autorisation préfectorale du projet, une garantie financière pour la réalisation du démantèlement des machines (lui aussi obligatoire) est aussi le gage d'une réhabilitation rapide du milieu où se situaient les machines.

3.2.5 Assurer les suivis post-implantation

Après définition des mesures d'atténuation, la mise en place d'un suivi environnemental, afin d'évaluer les impacts lors de la phase de fonctionnement du parc, est obligatoire (MEEM, 2016 ; MTES, 2018).

En France, ces suivis sont prévus par l'article 12 de l'arrêté ICPE du 26 août 2011 relatif aux installations de production d'électricité utilisant l'énergie mécanique du vent au sein d'une installation soumise à autorisation au titre de la rubrique 2980 de la législation des installations classées pour la protection de l'environnement et par le point 3.7 de l'annexe I de l'arrêté du 26 août 2011 relatif aux installations de production d'électricité utilisant l'énergie mécanique du vent au sein d'une installation soumise à déclaration au titre de la rubrique 2980 de la législation des installations classées pour la protection de l'environnement :

« Au moins une fois au cours des trois premières années de fonctionnement de l'installation puis une fois tous les dix ans, l'exploitant met en place un suivi environnemental permettant notamment d'estimer la mortalité de l'avifaune et des chiroptères due à la présence des aérogénérateurs. Lorsqu'un protocole de suivi environnemental est reconnu par le ministre chargé des installations classées, le suivi mis en place par l'exploitant est conforme à ce protocole. Ce suivi est tenu à disposition de l'inspection des installations classées. »

Lorsque cela a été prévu dans l'étude d'impact ou imposé par arrêté préfectoral, d'autres suivis environnementaux peuvent être imposés, par exemple pour surveiller l'évolution des habitats naturels, suivre des stations d'espèces végétales protégées ou des habitats communautaires, suivre l'activité de l'avifaune ou des chiroptères.

Si la méthodologie BACI (*Before-After Control Impact*, voir 3.2.2.1. Recherches bibliographiques – récolter les données) a été mise en place lors de l'étude d'impact, les techniques d'inventaire post-implantation doivent être similaires à celles de la période pré-construction, et ce sur le site éolien et le site contrôle, afin de pouvoir comparer les résultats entre eux tout en faisant fi de l'influence des variabilités spatiales et inter-annuelles (MEEM, 2016).

Ce contrôle permet d'identifier d'éventuels impacts du parc éolien sur la biodiversité, d'imposer la mise en œuvre de mesures destinées à éviter, réduire ou compenser ces impacts, et de renouveler le suivi pour s'assurer de leur efficacité (MTES, 2018).

3.2.5.1 Suivi de la mortalité

La mortalité sur un parc éolien est calculée à partir de plusieurs variables, dont la première est la mortalité observée, c'est-à-dire le nombre de cadavres d'oiseaux et de chauves-souris retrouvés au pied des machines. Ce suivi doit être réalisé à intervalles réguliers (jamais moins d'une fois par semaine) sur une période incompressible de 20 semaines qui doit être étendue si des espèces patrimoniales (inscrites en liste rouge ou à l'annexe I) utilisent le site éolien. Le rayon de recherche sera au moins égal à la longueur des pales avec un minimum de 50 m (Groupe Chiroptères de la SFEPM, 2016c ; MTES, 2018).

Pour les chiroptères, la période d'activité va de mars à octobre, avec deux moments importants que sont les migrations printanière (fin février à début avril) et automnale (mi-août à fin octobre, voire novembre) et qui doivent être couvertes, ainsi que l'été si des colonies de parturition ont été identifiées à proximité (Groupe Chiroptères de la SFEPM, 2016c).

Photo 10 – Le maintien d'une végétation rase facilite les suivis de la mortalité, mais représente aussi un terrain de chasse favorable pour les rapaces.



© Simon Gauthier/ONCFS

Concernant l'avifaune, les suivis dépendront des espèces observées et de leur période de présence sur le site pendant l'année : en hivernage, en migration ou en nidification (MTES, 2018).

En plus de la mortalité observée, c'est-à-dire le nombre de cadavres découverts durant les prospections, d'autres valeurs doivent être mesurées pour ensuite obtenir la mortalité estimée la plus proche possible de la mortalité réelle (Smallwood, 2007) :

- la durée moyenne de persistance des cadavres, c'est-à-dire la vitesse à laquelle les cadavres disparaissent à cause des prédateurs et charognards sur le site. Un test de terrain doit être réalisé pour calculer cette valeur, en déposant des carcasses de rongeurs et d'oiseaux et en contrôlant tous les jours leur présence ;
- le taux d'efficacité de recherche, soit le pourcentage de découverte de cadavres tests sur un parc par la personne chargée du suivi ;
- la surface prospectée si celle-ci est inférieure à la surface prévue, à cause du relief par exemple (**photo 10**).

À partir des différentes valeurs obtenues, la mortalité estimée du parc peut être calculée grâce à plusieurs formules mathématiques. Considérant la grande variabilité de leurs résultats, plusieurs d'entre elles doivent être utilisées conjointement (Groupe Chiroptères de la SFPEM, 2016c ; MTES, 2018).

Les formules d'Erickson *et al.* (2000), Jones *et al.* (2009) et d'Huso (2010), sont les plus utilisées, mais d'autres plus récentes et plus précises ont fait leur apparition : Korner-Nievergelt *et al.*, 2011, Bastos *et al.*, 2013, Limpens *et al.*, 2013, Péron *et al.*, 2013, Huso *et al.*, 2015 et Korner-Nievergelt, 2015.

Plus important encore que le résultat donné par ces formules : l'intervalle de confiance associé. Celui-ci devrait être systématiquement calculé afin de démontrer la pertinence (ou non) des résultats obtenus. Pour ce faire, il pourra être utile d'utiliser les applications en ligne développées par le CEFE – EPHE (Besnard & Bernard, 2018).

En raison de tous les facteurs entrant en compte dans l'estimation de la mortalité, celle-ci est parfois sous-estimée par rapport à la mortalité réelle, notamment dans les cas où aucun cadavre n'est trouvé sous les éoliennes (Huso *et al.*, 2015).

Un parc où aucun cadavre n'aura été observé n'est pas pour autant un parc avec une mortalité nulle. En effet, si la probabilité de découverte sur le site, qui dépend de nombreux facteurs comme l'observateur, la saison, le couvert végétal, etc., est faible, et qu'aucun oiseau ou chauve-souris n'est trouvé, la mortalité réelle sera alors grandement sous-estimée. Au contraire, si la probabilité de découverte est forte, alors cette mortalité observée nulle peut être considérée comme proche de la mortalité réelle (Huso *et al.*, 2015).

Huso *et al.* (2015) ont réussi à calculer cette mortalité estimée pour des sites où aucun cadavre n'avait été retrouvé, à partir des différents paramètres connus, en utilisant le théorème de Bayes. Ils ont ainsi mis en avant l'importance de la probabilité de détection sur l'estimation de cette mortalité, et qu'une valeur élevée donnait un résultat beaucoup plus fiable (Huso *et al.*, 2015).

Mais malgré cette possibilité d'estimer la mortalité sur un parc sans retrouver de cadavre, il reste impossible d'identifier les espèces impactées, une information pourtant tout aussi importante que le nombre de collisions sur le site (Beston *et al.*, 2015).

À cela s'ajoutent les paramètres contrôlés par l'observateur, que sont le protocole de recherche (lignes parallèles, spirale ou trajet aléatoire), la période de suivi (nombre de semaines) et l'intervalle de suivi (nombre de jours entre les recherches). Alors que le type de protocole ne semble pas influencer les résultats de la recherche, la durée de celle-ci et les intervalles sont très importants : une période de suivi trop courte ou trop de temps laissé entre les prospections diminuent grandement les chances de découvrir un cadavre (Santos *et al.*, 2017).

L'utilisation de chiens permettrait d'augmenter le taux de découverte, mais cette méthode est encore peu répandue (Paula *et al.*, 2011b ; Mathews *et al.*, 2013 ; Mathews *et al.*, 2016). Si cette méthode peut permettre d'accélérer la réalisation des suivis, elle est également sujette à certaines limites : les temps humides et les températures élevées n'étant pas propices à une bonne efficacité de recherche.

Santos *et al.* (2017) recommandent de diminuer le nombre de suivis (moins de mois dans l'année) pour se concentrer sur les périodes où les enjeux sont les plus importants (hivernage, migration, nidification, parturition, *swarming*, etc.). Ces moments doivent alors faire l'objet d'un suivi plus dense, avec notamment des prospections journalières, pour augmenter les chances de découverte de cadavres en limitant l'influence de certains facteurs comme l'enlèvement par les prédateurs et charognards (Santos *et al.*, 2017).

De plus, un suivi plus dense est indispensable pour identifier des espèces impactées, notamment les plus rares et les plus patrimoniales. En effet, bien que l'application de facteurs de correction permette d'aboutir à une estimation de la mortalité réelle, elle ne permet pas d'identifier les espèces qui auraient échappé à l'effort de prospection (Beston *et al.*, 2015).

La technique du *barcoding*² moléculaire commence à être utilisée pour identifier plus facilement des cadavres de chiroptères grâce à leur ADN mitochondrial. Toutefois, certaines espèces très proches génétiquement ne peuvent être déterminées grâce à cette méthode (Korstian *et al.*, 2016).

En définitive, même si les méthodes de calcul de la mortalité s'améliorent d'année en année et donnent des résultats de plus en plus proches de la mortalité réelle sur un parc, son estimation n'est pour l'instant pas fiable à 100 % à moins de surveiller l'ensemble d'un site vingt-quatre heures sur vingt-quatre, tâche très contraignante (et coûteuse) au vu des connaissances et moyens technologiques actuels.

2. Le *barcoding* moléculaire utilise de courtes séquences d'ADN spécifique dans le but de caractériser génétiquement un individu ou un groupe d'individus.

De plus, barotraumatismes et collisions ne provoquant pas toujours un décès immédiat des chauves-souris touchées, une part non négligeable de celles-ci pourrait ne pas être comptabilisée si les individus ont pu s'éloigner des éoliennes (Baerwald *et al.*, 2008 ; Grodsky *et al.*, 2011 ; Rollins *et al.*, 2012 ; Voigt *et al.*, 2015).

Cette part non comptée de victimes risque d'augmenter face à des éoliennes aux pales de plus en plus longues qui accentuent le risque de blessure dans la zone balayée (Voigt *et al.*, 2015). C'est pourquoi il est recommandé d'étendre la zone de prospection au-delà de 50 m pour les éoliennes les plus grandes (Marx, 2017).

À l'heure actuelle, les mortalités directes par collision ou barotraumatisme sont présentes comme étant la cause principale de mortalité chez les chiroptères (Rollins *et al.*, 2012) en ce qui concerne la problématique éolienne.

3.2.5.2 Suivi de l'activité

En plus des prospections au pied des éoliennes, un suivi de l'activité chiroptérologique en altitude doit être réalisé systématiquement lorsque celui-ci n'a pas été réalisé dans le cadre de l'étude d'impact. Des suivis avifaunistiques spécifiques doivent également être réalisés s'ils ont été prescrits dans l'arrêté d'autorisation d'exploiter ou un arrêté complémentaire (présence d'espèces sensibles à l'éolien ou impact résiduel significatif), afin de juger si l'implantation des machines a modifié l'utilisation du site par les espèces, d'observer le comportement des oiseaux à proximité des éoliennes ou d'estimer l'efficacité de mesures de compensation.

C'est pour ces observations que la méthodologie BACI est utile et permet de détecter les changements sur le site, tout en identifiant la part de variation liée au lieu et à la période (Marques *et al.*, 2014).

L'intensité et la périodicité de ces suivis dépendent évidemment des enjeux et impacts mis en évidence lors de l'étude d'impact, et sont définies à ce moment.

Le nombre d'espèces et d'individus et le comportement sur site des oiseaux sont évalués. Ce dernier est observé pour savoir si la zone est utilisée pour la chasse, la nidification ou l'hivernage, mais aussi pour connaître l'attitude des individus en vol par rapport aux éoliennes (s'ils les contournent, les évitent, passent à travers ou au-dessus, etc.) et ainsi noter un potentiel effet barrière qui induirait une perte d'habitat pour certains individus ou certaines espèces (Pruett *et al.*, 2009 ; Villegas-Patracca *et al.*, 2014).

Ce suivi doit être réalisé durant les phases du cycle biologique où les espèces d'oiseaux ciblées sont présentes : reproduction, migrations (printanière et/ou automnale), hivernage.

Le suivi de l'activité chiroptérologique en altitude est imposé par le Protocole de suivi environnemental des parcs éoliens terrestres validé par le MTES en 2018. Celui-ci doit couvrir toute la période pendant laquelle les chiroptères présentent un enjeu, notamment entre les semaines 20 et 43 (MTES, 2018).

3.2.5.3 Suivi des habitats naturels

Les habitats étant un aspect essentiel de la conservation des oiseaux et chiroptères, mais aussi d'autres taxons, il peut s'avérer utile de surveiller leur évolution sur les zones d'implantation des parcs éoliens, notamment lorsque les travaux ont conduit à les dégrader ou que des mesures compensatoires spécifiques ont été prescrites. Ce suivi doit alors être réalisé grâce à une méthode identique à celle employée lors de l'évaluation environnementale.

Ce suivi des habitats peut être complété, au besoin, par un suivi des stations d'espèces protégées ou d'habitats d'intérêt communautaire afin de s'assurer de leur bonne conservation (MTES, 2016).

3.2.5.4 Conclusion du suivi post-implantation

Une fois les suivis terminés, ceux-ci peuvent être comparés (MTES, 2016) avec les résultats de l'étude environnementale et des impacts résiduels.

Une des difficultés de cette comparaison sera d'écarter la part liée aux variations inter-annuelles et locales, qui est présente sur chaque site. La mise en place d'une méthodologie de type BACI dès le début du diagnostic permet, grâce à la présence d'un site témoin, d'identifier cet apport des facteurs « temps » et « site » et donc de plus facilement mettre en avant un possible impact lié directement à l'implantation des éoliennes (MEDDE, 2015 ; MEEM, 2016).

Si les suivis post-implantation ont mis en évidence des impacts significatifs, alors il est indispensable de renforcer les mesures d'atténuation déjà en place ou d'en instaurer de nouvelles, et de renouveler ces suivis de manière à s'assurer de l'efficacité des mesures mises en œuvre (MTES, 2018).

Cela peut, par exemple, être un durcissement des paramètres d'asservissement des machines pour augmenter les périodes d'arrêt ou la mise en place de détecteurs de proximité pour les oiseaux. Dans tous les cas, il est préférable de privilégier des méthodes dont l'efficacité est reconnue (MTES, 2018).

3.3 Éolien en mer

Bien que l'emplacement du parc, la disposition des machines et l'asservissement des éoliennes soient aussi des moyens d'atténuation des impacts sur les parcs éoliens marins (*offshore*), la spécificité de ceux-ci ainsi que de leur environnement (faune et flore rencontrées) ne permet pas d'appliquer exactement les mêmes méthodes et recommandations que pour les parcs éoliens terrestres (*onshore*).

Toutefois, des directives similaires peuvent s'appliquer :

- l'emplacement du parc doit éviter les corridors de migration de l'avifaune et des chiroptères, ainsi que les sites d'importance pour ces taxons et les autres (Garthe & Hüppop, 2004 ; Larsen & Guillemette, 2007) ;
- la délimitation de zones favorables ou non favorables à l'implantation d'éoliennes au niveau national voire au niveau européen – important pour les espèces migratrices – permettrait un meilleur placement des parcs tout en limitant dès le départ les impacts sur la biodiversité et sur les fonds marins ;
- la disposition des machines doit éviter l'effet barrière si le parc se trouve sur un couloir de déplacement pour les oiseaux et chauves-souris ;
- des éoliennes plus grandes diminueraient le risque de collision pour les populations locales d'oiseaux marins, mais pourraient l'augmenter pour les individus en migration (Johnston *et al.*, 2014) ;
- de la même façon, des éoliennes plus grandes diminueraient les risques de collision pour les chiroptères car ceux-ci volent à basse altitude lorsqu'ils se déplacent au-dessus de l'eau. Toutefois, des individus se mettant en chasse prendront de l'altitude et pourront donc se retrouver à hauteur de pales, d'autant que la ressource alimentaire peut être très importante (Ahlén *et al.*, 2009) ;
- la phase de construction est la période à même de provoquer le plus d'impacts, notamment par pollution sonore, et des précautions doivent être prises, comme définir des périodes à risques où le bruit doit être limité (Jolivet *et al.*, 2015 ; Nehls *et al.*, 2015) ;
- un asservissement des machines peut être mis en place pour limiter leur fonctionnement lors des périodes de fortes migrations aviaires (Fijn *et al.*, 2015) ;
- l'éclairage non réglementé (c'est-à-dire hors balisage) doit être réglé au minimum pour éviter d'attirer des individus en cas de mauvais temps ;
- les fondations des éoliennes peuvent constituer de bons récifs artificiels et permettre d'augmenter la richesse de la faune et de la flore sur le site. Cette conséquence pourrait être considérée comme une compensation pour les impacts préalables de l'installation de ces éoliennes (Smyth *et al.*, 2015 ; Gartman *et al.*, 2016b), mais ces nouveaux substrats durs peuvent aussi perturber les communautés de substrats mous en facilitant l'apparition de nouvelles espèces sur les fondations (Kerckhof *et al.*, 2012 ; Krone *et al.*, 2013).

Bien qu'il n'y ait pas encore de parcs éoliens *offshore* posés en France, le sujet mérite d'être approfondi et préparé dès maintenant puisque les premières machines devraient être mises en fonctionnement à partir de 2021 sur trois sites différents : Saint-Nazaire (Loire-Atlantique), Fécamp (Seine-Maritime) et Courseulles-sur-Mer (Calvados). D'autres suivront : Saint-Brieuc, Noirmoutier, le Tréport, Dunkerque, etc.

L'éolien flottant est également une technologie en devenir. Quatre premières fermes pilotes sont déjà installées ou en voie de l'être (Gruissan, Bretagne Sud, Faraman et Leucate).

3.4 Conclusion

Bien que ce tour d'horizon des moyens d'atténuation des impacts montre un très grand nombre d'outils et de méthodes existants, peu d'entre eux ont fait la preuve d'une réelle efficacité, et la littérature scientifique concernant ce point est peu abondante (NWCCMS & Rectenwald, 2007 ; Marques *et al.*, 2014 ; Gartman *et al.*, 2016b).

Seules quelques méthodes ont montré leur efficacité, le choix du site étant la plus efficace (May *et al.*, 2015 & 2017a et b ; Gartman *et al.*, 2016a ; MEEM, 2016). L'asservissement des machines basé sur des algorithmes (pour les chiroptères) a lui aussi fait ses preuves même s'il reste imparfait (Voigt *et al.*, 2015). Concernant les oiseaux, l'efficacité des dispositifs d'asservissement basés sur la détection des individus reste encore à préciser et à améliorer, mais ceux-ci pourraient participer à la réduction des impacts en complément de mesures de génie écologique visant à rendre le parc éolien moins attractif tout en s'assurant de la possibilité pour les espèces cibles de se reporter sur des habitats favorables à proximité.

Le rôle de la recherche est primordial dans les années à venir pour réduire encore les impacts des éoliennes sur leur environnement.

De plus en plus de travaux se concentrent aussi sur les comportements des animaux vis-à-vis des éoliennes, et sont indispensables pour mieux développer une atténuation efficace (Masden *et al.*, 2012 ; Arnett *et al.*, 2015 ; Gartman *et al.*, 2016b ; Łopucki *et al.*, 2017).

Conclusion générale



La transition énergétique – c'est-à-dire la diminution de la production et de la consommation d'énergie et la substitution des énergies fossiles par un bouquet d'énergies renouvelables – est aujourd'hui cruciale pour échapper aux pires ravages du changement climatique. L'éolien est un des principaux piliers de cette transition énergétique et il ne doit pas être une menace supplémentaire pour la biodiversité.

Altération voire destruction des habitats en phase travaux, collisions avec la faune volante, perturbations du comportement, pertes d'habitats, etc. : les impacts potentiels sont nombreux et variables suivant les sites d'implantation. Dans l'ensemble, ceux-ci peuvent toutefois être évités et, dans tous les cas, atténués.

La planification en amont des projets, consistant à préserver les territoires présentant les plus forts enjeux de biodiversité de l'implantation d'éoliennes, est le principal levier de la séquence ERC. Faire l'impasse sur cette planification, c'est se priver d'une possibilité simple pour éviter les impacts les plus importants sur la flore, les habitats et la faune volante. C'est aussi placer sa confiance dans des mesures de réduction ou de compensation qui ne sont pourtant pas toutes éprouvées.

L'altération, voire parfois la destruction, de la flore ou d'habitats d'espèces patrimoniales peuvent être évitées par la préservation des sites les plus sensibles et par le positionnement approprié des éoliennes et des infrastructures afférentes.

En ce qui concerne les oiseaux, deux groupes sont principalement impactés en France jusqu'à aujourd'hui : les passereaux que l'on retrouve essentiellement sous les éoliennes au moment des pics de migration nocturne, et les rapaces diurnes qui entrent en collision avec les éoliennes durant toute la période où ils sont présents sur le site (en migration, en période de nidification voire toute l'année pour les sédentaires) (Erickson *et al.*, 2014 ; Marx, 2017). Ces deux groupes sont également sujets au dérangement en phase d'exploitation, ce qui peut se traduire par des échecs de nidifications ou des pertes d'habitat (Garcia *et al.*, 2015 ; Gómez-Catasús *et al.*, 2018 ; Itty *et al.*, 2018).

Les oiseaux marins et ceux inféodés aux zones humides sont également sensibles aux collisions et/ou au dérangement mais leurs espaces vitaux sont, jusqu'à aujourd'hui, plutôt préservés en France (Roux *et al.*, 2013 ; Marx, 2017).

Si l'impact de la mortalité directe par collision à l'échelle de populations d'oiseaux fait de plus en plus l'objet de publications (Goodale & Stenhouse, 2016 ; Tack *et al.*, 2017), celui du dérangement et en particulier de l'« effet barrière » reste peu étudié, notamment lorsqu'il résulte de l'implantation cumulée de multiples parcs éoliens sur un territoire donné.

Les dispositifs techniques visant à réduire le risque de collision des oiseaux avec les éoliennes ne permettent pas, aujourd'hui, d'éviter à eux seuls la mortalité d'individus appartenant à des espèces patrimoniales sur des sites présentant de forts enjeux avifaunistiques, et ne sont pas en mesure d'enrayer l'impact de cette surmortalité éolienne sur la dynamique de certaines populations de rapaces (Duriez *et al.*, 2018). Ces dispositifs devraient faire l'objet de travaux de recherche plus poussés afin de déterminer leur efficacité réelle et les marges d'amélioration.

En attendant, l'évitement des sites présentant un intérêt pour les espèces patrimoniales et la réduction de l'emprise des projets vis-à-vis des voies de déplacement de l'avifaune restent aujourd'hui les mesures les plus efficaces pour réduire le risque de collision et de dérangement en phase d'exploitation. L'augmentation de la garde au sol au-delà de 30 m apparaît également comme une mesure efficace pour réduire le risque de collision avec de nombreuses espèces volantes.

En ce qui concerne les chiroptères, demeurent deux questions fondamentales auxquelles la recherche a besoin de répondre :

- pourquoi les éoliennes ont un effet attractif mais également répulsif sur les chauves-souris (Cryan *et al.*, 2014, Barré *et al.*, 2018) ?
- Quel est l'état des populations européennes de chiroptères, leur démographie et l'impact de l'éolien sur ces populations (Arnett *et al.*, 2011 ; Frick *et al.*, 2017) ?

L'identification du ou des réels facteurs d'attractivité des éoliennes pour les chauves-souris permettrait par exemple de le ou les supprimer ou les réduire en modifiant les machines ou leur disposition. Les individus pourraient confondre les éoliennes avec des arbres et pensent y trouver un gîte, des congénères ou de la nourriture (Cryan, 2008 ; Rydell *et al.*, 2010b ; Cryan *et al.*, 2014 ; Rydell *et al.*, 2016).

À cela s'ajoute un autre besoin urgent, celui d'améliorer la qualité des études d'impacts concernant ce taxon (Arnett *et al.*, 2015). En effet, Lintott *et al.* (2016) considèrent que les études actuelles sous-estiment les impacts des projets sur les chauves-souris, et que même dans le cas où ils sont correctement évalués, les mesures prises en conséquence ne sont pas suffisantes. D'une manière générale, et même si des avancées sont observées ces dernières années en France, notamment depuis la réforme de l'étude d'impact liée à la loi Grenelle II, des progrès restent à faire concernant certains volets des études (continuités écologiques, effets cumulés, etc.). Surtout, l'évitement reste le parent pauvre de la séquence ERC et la significativité de chaque impact reste mal définie (Bigard *et al.*, 2017).

En ce qui concerne les chiroptères, cet échec de l'anticipation des impacts est notamment dû à l'attractivité que provoquent les futures éoliennes et qui n'est pas mesurable. L'absence de suivi de l'activité à hauteur de pales dans la plupart des études est aussi une cause de sous-estimation (Collins & Jones, 2009 ; Lintott *et al.*, 2016 ; Mathews *et al.*, 2016) mais la validation du nouveau protocole de suivi environnemental par le ministère en 2018 devrait conduire à une généralisation de ces mesures en France.

Les performances aléatoires des logiciels d'identification automatique des signaux acoustiques sont aussi en cause. Rydell *et al.* (2017) recommandent donc la plus grande prudence vis-à-vis de leur utilisation qui montre encore des résultats peu fiables pour certains groupes (les murins en tête).

Du fait de l'attractivité exercée par les éoliennes, l'activité chiroptérologique mesurée avant l'implantation des éoliennes est souvent décorrélée de la mortalité mesurée une fois les machines en fonctionnement, puisque l'arrivée de ces dernières modifie la distribution des individus, leur activité et leur comportement sur la zone (Horn *et al.*, 2008b ; Hein *et al.*, 2013). Ceci est d'autant plus vrai lorsque le parc est construit en forêt mixte, ce qui peut impliquer la création de nouveaux habitats encore plus favorables aux chiroptères (lisières et allées forestières).

Comme c'est déjà le cas en France, les britanniques Lintott *et al.* (2016) suggèrent donc de rendre obligatoires les suivis post-implantation pour tous les parcs, même quand aucun impact significatif n'est attendu. Une telle mesure, étendue à toute l'Europe, permettrait sûrement de réduire la mortalité sur de nombreux parcs dont l'étude d'impact a sous-estimé les risques (Lintott *et al.*, 2016).

Cette recommandation pourrait se révéler utile pour les oiseaux, dont il peut aussi être difficile de prédire la mortalité à partir des inventaires pré-construction (Ferrer *et al.*, 2012).

Toutefois, un projet éolien aura toujours des impacts, même avec un ensemble de mesures d'évitement et de réduction en accompagnement. C'est notamment le cas de la perte d'habitats liée à l'implantation des machines, ou du risque de collision qui n'est jamais nul. Les mesures de compensation semblent donc indispensables à tout projet (Vaissière, 2014 *in* Gartman *et al.*, 2016b).

La sous-estimation des impacts cumulés des projets devrait en outre pousser les développeurs à viser un gain net en matière de compensation, plutôt que le *no net loss* (pas de perte nette) promu par les autorités (Gartman *et al.*, 2016b). Il s'agirait d'appliquer à la lettre l'article L. 163-1 créé par la loi n° 2016-1087 du 8 août 2016 pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages.

De nombreux points restent à améliorer, de nombreuses pistes à explorer pour faire progresser les connaissances sur l'éolien et ses impacts, sur les façons de les éviter, et aussi et surtout sur les méthodes permettant à la fois le développement de l'éolien et la préservation de la biodiversité (May *et al.*, 2017b).

Piorkowski *et al.* (2012), Wang *et al.* (2015) et Coly *et al.* (2017) citent notamment le besoin de méthodes standardisées (pour les inventaires et suivis de mortalité par exemple), la collecte de toutes les données concernant les parcs éoliens (inventaires, mortalité, etc.), le développement de modèles de prédiction des risques, des recherches sur les effectifs cumulés, etc.

En France, plusieurs organismes, dont la LPO, la SFPEM (Société française d'étude et de protection des mammifères) et le MNHN (Muséum national d'histoire naturelle), travaillent dans ce sens et demandent une homogénéisation des protocoles, ainsi que la publication et la compilation des données par un même organisme (Marx, 2017). La validation par le ministère du nouveau protocole de suivi environnemental des parcs éoliens terrestres (MTES, 2018) va dans ce sens.

Pour accompagner ces recherches, il y a un besoin fort d'une réglementation internationale (au moins à l'échelle continentale, voire transcontinentale) permettant une protection efficace des oiseaux et chiroptères migrateurs à travers les différents pays qu'ils traversent (Voigt *et al.*, 2012).

L'interdiction de l'éolien sur les sites du réseau « Natura 2000 », notamment les ZPS (directive Oiseaux) et les ZSC (directive Habitats) en faveur des chiroptères, est un exemple de mesures que plusieurs organismes comme la LPO et l'ONCFS recommandent de mettre en place en France, et dont l'application sur tout le réseau européen serait bénéfique (Marx, 2017).

“When you look at a wind turbine, you can find the bird carcasses and count them. With a coal-fired power plant, you can't count the carcasses, but it's going to kill a lot more birds.”

« Quand vous regardez une éolienne, vous pouvez voir les carcasses d'oiseaux et les compter. Avec une centrale à charbon, vous ne pouvez pas compter les carcasses, mais cela va tuer beaucoup plus d'oiseaux. »

John Flicker, président de la National Audubon Society.

Annexes



Bibliographie

- ADEME, 2011. Dans l'air du temps, l'énergie éolienne, 32 p. http://ademe.typepad.fr/files/guide_ademe_energie_eolienne.pdf.
- ADEME, 2016. Impacts environnementaux de l'éolien français.
- Ahlén, I. 2003. Wind turbines and bats – a pilot study. SLU department of conservation biology final report. Swedish National Energy Administration, Eskilstuna, Sweden.
- Ahlén, I., Baagøe, H.J. & Bach, L. 2009. Behavior of Scandinavian bats during migration and foraging at sea. *Journal of Mammalogy* 90 (6): 1318-1323. <https://doi.org/10.1644/09-MAMM-S-223R.1>.
- Alerstam, T., Lindgren, A., Nilsson, G. & Ulfstrand, S. 1973. Nocturnal passerine and cold front passages in autumn – a combined radar and field study. *Ornis Scand.* 4: 103–111. <https://www.jstor.org/stable/3676111>.
- Alerstam, T. 1990. Bird Migration. Cambridge, Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1046/j.1420-9101.1992.5030529.x>.
- Allison, T.D. 2012. Eagles and wind energy: identifying research priorities. A white paper of the American Wind Wildlife Institute. AWWI, Washington, D.C., USA. 39 p.
- Alvares, F., Rio-Maior, H., Roque, S., Nakamura, M., Cadete, D., Pinto, S. & Petrucci-Fonseca, F. 2011. Assessing ecological responses of wolves to wind power plants in Portugal: methodological constraints and conservation implications. In: Proceedings of the conference on wind energy and wildlife impacts, 2-5 May 2011, Trondheim, Norway. NINA report 603: May R. & Bevinger K. (eds), 140 p.
- American Wind Wildlife Institute, 2016. Wind turbine interactions with wildlife and their habitats: a summary of research results and priority questions. <https://awwi.org/wp-content/uploads/2016/07/AWWI-Wind-Wildlife-Interactions-Summary-June-2016.pdf>.
- André, Y. 2009. Protocoles de suivis pour l'étude des impacts d'un parc éolien sur l'avifaune. Programme national éolien-biodiversité. Révision 2009. 21 p.
- Averbeck, P. 2015. Analyse du potentiel et des impacts environnementaux de l'implantation d'éoliennes en forêt – le cas de la Wallonie (Belgique). Mémoire de Master, sciences et gestion de l'environnement. Bruxelles, université libre de Bruxelles. 119 p.
- Avian Power Line Interaction Committee (APLIC). 1994. Mitigating bird collisions with power lines: the state of the art in 1994. Edison Electric Institute. Washington, D.C., USA. 128 p.
- Arnett, E.B. (technical editor). 2005. Relationships between bats and wind turbines in Pennsylvania and West Virginia: an assessment of bat fatality search protocols, patterns of fatality, and behavioural interactions with wind turbines. À final report submitted to the Bats and Wind Energy Cooperative. Bat Conservation International, Austin, Texas, USA. 187 p.
- Arnett, E.B., Brown, W.K., Erickson, W.P., Fiedler, J.K., Hamilton, B.L., Henry, T.H., Jain, A., Johnson, G.D., Kerns, J., Koford, R.R., Nicholson, C.P., O'Connell, T.J., Piorkowski, M.D. & Tankersley Jr, R.D. 2008. Patterns of bat fatalities at wind energy facilities in North America. *Journal of Wildlife Management* 72 (1): 61-78.
- Arnett, E.B., Schirmacher, M., Huso, M.M.P. & Hayes, J.P. 2009. Effectiveness of changing wind turbine cut-in speed to reduce bat fatalities at wind facilities. An annual report submitted to the Bats and Wind Energy Cooperative. Bat Conservation International. Austin, Texas, USA. 45 p.
- Arnett, E.B., Huso, M.M.P., Schirmacher, M.R. & Hayes, J.P. 2011. Altering turbine speed reduces bat mortality at wind-energy facilities. *Frontiers in Ecology and the Environment* 9 (4): 209-214.
- Arnett, E.B., Barclay, R.M.R. & Hein, C.D. 2013a. Thresholds for bats killed by wind turbines. *Frontiers in Ecology and the Environment* 11 (4): 171.
- Arnett, E.B., Hein, C.D., Schirmacher, M.R., Huso, M.M.P. & Szewczak, J.M. 2013b. Evaluating the effectiveness of an ultrasonic acoustic deterrent for reducing bat fatalities at wind turbines. *PLoS ONE* 8 (6): e65794.
- Arnett, E.B., Johnson, G.D., Erickson, W.P. & Hein, C.D. 2013c. A synthesis of operational mitigation studies to reduce bat fatalities at wind energy facilities in North America. À report submitted to the National Renewable Energy Laboratory. Bat Conservation International. Austin, Texas, USA. 38 p.
- Arnett, E.B., Baerwald, E.F., Mathews, F., Rodrigues, L., Rodriguez-Duran, A., Rydell, J., Villegas-Patracca, R. & Voigt, C.C. 2015. Impacts of wind energy development on bats: a global perspective. In *Bats in the Anthropocene: conservation of bats in a changing world*. Chapitre 11: 295-323.
- Arthur L. & Lemaire M. 2015. Les Chauves-souris de France, Belgique, Luxembourg et Suisse. Seconde édition.

- Paris, Biotope, Muséum national d'Histoire naturelle. Collection « Parthénope », 544 p.
- Aschwanden, J., Birrer, S. & Jenni, L. 2005. Are ecological compensation areas attractive hunting sites for common kestrels (*Falco tinnunculus*) and long-eared owls (*Asio otus*)? *Journal of Ornithology* 146 (3): 279-286.
- Aschwanden, J., Komenda-Zehnder, S., Guélat, J., Mateos, M. & Liechti, F. 2013. A model based bird migration sensitivity map as a tool for decision makers in wind farm planning. In Conference on wind power and environmental impacts, 6th February 2013, Stockholm, Sweden.
- Austad, S. N. & Fischer, K. E. 1991. Mammalian aging, metabolism, and ecology: evidence from the bats and marsupials. *Journal of Gerontology*, 46 (2), B47-B53.
- Bach, L. & Rahmel, U. 2004. Summary of wind turbine impacts on bats – assessment of a conflict. *Bremer Beiträge für Naturkunde und Naturschutz* 7: 245-252.
- Baerwald, E.F. & Barclay, R.M.R. 2009. Geographic variation in activity and fatality of migratory bats at wind energy facilities. *Journal of Mammalogy* 90 (6): 1341-1349.
- Baerwald, E.F. & Barclay, R.M.R. 2011. Patterns of activity and fatality of migratory bats at a wind energy facility in Alberta, Canada. *The Journal of Wildlife Management* 75 (5): 1103-1114.
- 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.
- Baerwald, E.F., Edworthy, J., Holder, M. & Barclay, R.M.R. 2010. A large-scale mitigation experiment to reduce bat fatalities at wind energy facilities. *The Journal of Wildlife Management* 73 (7): 1077-1081.
- Balotari-Chiebao, F., Villers, A., Ija's, A., Ovaskainen, O., Repka, S. & Laaksonen, T. 2016. Post-fledging movements of white-tailed eagles: Conservation implications for wind-energy development. Royal Swedish Academy of Sciences 2016: Doi: 10.1007/s13280-016-0783-8.
- Barclay, R.M.R., Baerwald, E.F. & Gruver, J.C. 2007. Variation in bat and bird fatalities at wind energy facilities: assessing the effects of rotor size and tower height. *J. Zool.* 85(3): 381-387. <https://www.nrcresearchpress.com/doi/abs/10.1139/Z07-011>.
- Barré, K., Julliard, R., Le Viol, I., Bas, Y. & Kerbiriou, C. 2017. Impact of wind turbines on bat activity: an omitted long-distance concern. Poster.
- 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* Volume 226, October 2018, Pages 205-214. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0006320718305469>.
- Barrios, L. & Rodriguez, A. 2004. Behavioural and environmental correlates of soaring-bird mortality at on-shore wind turbines. *Journal of Applied Ecology* 41 (1): 72-81.
- Bastos, R., Santos, M. & Cabral, J.M. 2013. A new stochastic dynamic tool to improve the accuracy of mortality estimates for bats killed at wind farms. *Ecological Indicators* 34: 428-440.
- Bay K., Nasman, K., Erickson, W., Taylor, K. & Kosciuch, K. 2016. Predicting eagle fatalities at wind facilities. *The Journal of Wildlife Management* 80 (6): 1000-1010.
- Behr, O., Hochradel, K., Mages, J., Nagy, M., Korner-Nievergelt, F., Niermann, I., Simon, R., Stiller, F., Weber, N. & Brinkmann, R. 2014. Bat-friendly operation algorithms: reducing bat fatalities at wind turbines in central Europe. In IEA Wind Task 34 Quarterly Webinar #1, September 2nd 2014.
- Behr, O., Baumbauer, L., Hochradel, K., Hurst, J., Mages, J., Nagy, M., Korner-Nievergelt, F., Niermann, I., Reers, H., Simon, R., Weber, N. & Brinkmann, R. 2015. "Bat-friendly" operation of wind turbines – the current status of knowledge and planning procedures in Germany. In Book for abstracts. Conference on wind energy and wildlife impacts (CWW 2015), March 10-12, 2015, Berlin, Germany. Köppel, J. & Schuster, E. (eds). 154 p.
- Behr, O., Brinkmann, R., Hochradel, K., Mages, J., Korner-Nievergelt, F., Niermann, I., Reich, M., Simon, R., Weber, N. & Nagy, M. 2017. Mitigating bat-mortality with turbine-specific curtailment algorithms: a model based approach. In Wind energy and wildlife interactions. Köppel, J. (eds): 135-160.
- Bellebaum, J., Korner-Nievergelt, F., Dürr, T., Mammen, U. 2013. Windturbine fatalities approach a level of concern in a raptor population. *J. Nat. Conserv.* 21(6):394-400. Doi: 10.1016/j.jnc.2013.06.001.
- Bennett, V.J. & Hale, A.M. 2014. Red aviation lights on wind turbines do not increase bat-turbine collisions. *Animal Conservation* 17 (4): 354-358.
- Besnard, A. & Bernard, C. 2018. Deux applications web en libre accès pour calibrer et évaluer la pertinence des suivis de mortalités sous les éoliennes. Actes du séminaire éolien et biodiversité, 21 et 22 novembre 2017, Artigues-près-Bordeaux, France, LPO : 37-39.
- Beston, J.A., Diffendorfer, J.E. & Loss, S. 2015. Insufficient sampling to identify species affected by turbine collisions. *The Journal of Wildlife Management* 9999: 1-5.
- Beucher Y., Richou C., Albespy F. 2018. Mortalité des chiroptères - Analyse comparée de la mise en place de mesures de régulation de 3 parcs éoliens. Actes du séminaire éolien et biodiversité, 21 et 22 novembre 2017, Artigues-près-Bordeaux, France, LPO : 81-87.
- Bigard, C., Regnery, B., Blasco, F. & Thompson, J.T. 2017. La prise en compte de la biodiversité dans les études d'impact : évolutions prometteuses mais lacunaires. Sciences Eaux & Territoires, la revue d'Irstea. Article

- hors-série numéro 39, 8 p. <http://www.set-revue.fr/sites/default/files/articles/pdf/set-revue-biodiversite-etude-impact.pdf>.
- BirdLife International, 2015. Review and guidance on use of “shutdown-on-demand” for wind turbines to conserve migrating soaring birds in the Rift Valley/Red Sea Flyway. Regional Flyway Facility. Amman, Jordan. Reported for BirdLife International. BirdLife International, Cambridge, United Kingdom. 49 p.
- Bishop, J., McKay, H., Parrott, D. & Allan, J. 2003. Review of international research literature regarding the effectiveness of auditory bird scaring techniques and potential alternatives: A white paper. Department of Environment, Food and Rural affairs, London, United Kingdom. 53 p.
- Blew, J., Nehls G. & Prall, U. 2013. Offshore obstruction lighting – issues and mitigation. In Conference on wind power and environmental impacts, 5-7 February 2013, Stockholm, Sweden.
- Blondel, J. 1969. Méthodes de dénombrement des populations d'oiseaux. In : Problèmes d'écologie : l'échantillonnage des peuplements animaux des milieux terrestres. Lamotte M., Bourlière F. (eds). Paris, Masson éditions : 97-151.
- Blondel, J., Ferry, C. & Frochot, B. 1970. La méthode des indices ponctuels d'abondance (IPA) ou des relevés d'avifaune par station d'écoute. *Alauda* 38 (1) : 55-71.
- Bohrer, G., Brandes, D., Mandel, J.T., Bildstein, K.L., Miller, T.A., Lanzone, M., Katzner, T., Maisonneuve, C. & Tremblay, J.A. 2012. Estimating updraft velocity components over large spatial scales: contrasting mitigation strategies of golden eagles and turkey vultures. *Ecology letters* 15 (2): 96-103.
- Bradbury, G., Trinder, M., Furness, B., Banks, A.N., Caldow, R.W.G. & Hume, D. 2014. Mapping seabird sensitivity to offshore wind farms. *PLoS ONE* 9 (9): e106366.
- Bridges, J.M., Anderson, T.R., Shulund, D., Spiegel, L. & Chervick, T. 2004. Minimizing bird collisions: what works for the birds and what works for the utility? In Environment Concerns in Rights-of-Way Management 8th International Symposium, 12-16 September 2004, Saratoga Springs, New York, USA.
- Bright, J.A., Langston, R.H.W., Bullman, R., Evans, R.J., Gardner, S., Pearce-Higgins, J. & Wilson, E. 2006. Bird sensitivity map to provide locational guidance for onshore wind farms in Scotland. RSPB research report n° 20. The Royal Society for the Protection of Birds, The Lodge, Sandy, Bedfordshire, United Kingdom, 140 p.
- Bright, J.A., Langston, R.H.W., Bullman, R., Evans, R., Gardner, S. & Pearce-Higgins, J. 2008. Map of bird sensitivities to wind farms in Scotland: a tool to aid planning and conservation. *Biological Conservation* 141 (9): 2342-2356.
- Brinkmann, R., Behr, O., Niermann, I. & Reich, M. (eds). 2011. Entwicklung von Methoden zur Untersuchung und Reduktion des Kollisionsrisikos von Fledermäusen an Onshore-Windenergieanlagen. Umwelt und Raum Bd. 4. Cuvillier Verlag, Göttingen (eds). 457 p.
- Bruderer, B. & Liechti, F. 1995. Variation in density and height distribution of nocturnal migration in the south of Israel. *Israel J. Zool.* 41: 447-487.
- Canada Bird Studies, 2016. Summary of the findings related to bird and bat fatalities, including corrected mortality estimates, based on post construction monitoring reports. <http://www.bsc-eoc.org/birdmon/wind/resources.jsp?dir=reports>.
- Carrete, M., Sánchez-Zapata, J.A., Benítez, J.R., Lobón, M. & Donázar, J.A. 2009. Large scale risk-assessment of wind-farms on population viability of a globally endangered long-lived raptor. *Biological Conservation* 142 (12): 2954-2961.
- Collier, M.P., Dirksen, S. & Krijgsveld, K.L. 2011. A review of methods to monitor collisions or micro-avoidance of birds with offshore wind turbines – Part 1: review. Report for The Crown Estate. Final report. 38 p.
- Collier, M.P., Dirksen, S. & Krijgsveld, K.L. 2012. A review of methods to monitor collisions or micro-avoidance of birds with offshore wind turbines – Part 2: Feasibility study of systems to monitor collisions. Report for The Crown Estate. Final report. 30 p.
- Collins, J. & Jones, G. 2009. Differences in bat activity in relation to bat detector height: implication for bats surveys at proposed windfarm sites. *Acta Chiropterologica* 11 (2): 343-350.
- Colman, J., Eftestøl, S., Tsegaye, D., Flydal, K. & Myrsterud, A. 2012. Is a wind-power plant acting as a barrier for reindeer *Rangifer tarandus tarandus* movements? *Wildlife Biology* 18 (4): 439-445.
- Coly R., Barré K., Gourdain P., Kerbirou C., Marmet J. & Tourout J. 2017. Études chiroptérologiques dans les dossiers réglementaires éoliens : disponibilité de l'information et conformité avec les recommandations nationales et européennes. *Naturae* 3 : 1-10.
- Conservatoire du Littoral. 2017. Le conservatoire [en ligne]. <http://www.conservatoire-du-littoral.fr/3-le-conservatoire.htm>.
- Cook, A.S.C.P., Ross-Smith, V.H., Roos, S., Burton, N.H.K., Beale, N., Coleman, C., Daniel, H., Fitzpatrick, S., Rankin, E., Norman, K. & Martin, G. 2011. Identifying a range of options to prevent or reduce avian collision with offshore wind farms using a UK-based case study. BTO research report n° 580. The British Trust for Ornithology. The Nunnery, Thetford, Norfolk, United Kingdom. 199 p.
- Cordeiro, A., Bernardino, J., Costa, H. & Mascarenhas, M. 2013. Long term survey of wind farms impacts on Common Kestrel's populations and definition of an appropriate mitigation plan (poster). In Wind Wildlife Research

- Meeting IX, November 27-30, 2012, Denver, Colorado, USA.
- Cortés-Avizanda, A., Carrete, M. & Donázar, J.A. 2010. Managing supplementary feeding for avian scavengers: guidelines for optimal design using ecological criteria. *Biological Conservation* 143 (7): 1707-1715.
- Cryan, P.M. 2008. Mating behavior as a possible cause of bat fatalities at wind turbines. *Journal of Wildlife Management* 72 (3): 845-849.
- Cryan, P.M. 2011. Wind turbines as landscape impediments to the migratory connectivity of bats. *Journal of Environmental Law* 41: 355-370.
- Cryan, P.M. & Barclay, R.M.R. 2009. Causes of bat fatalities at wind turbines: hypotheses and predictions. *Journal of Mammalogy* 90 (6): 1330-1340.
- Cryan, P.M. & Brown, A.C. 2007. Migration of bats past a remote island offers clues toward the problem of bat fatalities at wind turbines. *Biological Conservation* 139 (1): 1-11.
- Cryan, P.M., Gorresen, P.M., Hein, C.D., Schirmacher, M.R., Diehl, R.H., Huso, M.M., Hayman, D.T.S., Fricker, P.D., Bonaccorso, F.J., Johnson, D.H., Heist, K. & Dalton, D.C. 2014. Behavior of bats at wind turbines. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111 (42): 15126-15131.
- Culina A., Marie Linton, D., Pradel, R., Bouwhuis, S., W. Macdonald, D. 2019. Live fast, don't die young: survival reproduction trade-offs in long-lived income breeders. *Journal of Animal Ecology*. Doi: 10.1111/1365-2656.12957. <https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1365-2656.12957>.
- Curry, R.C. & Kerlinger, P. 2000. Avian mitigation plan: Kenetech model wind turbines, Altamont Pass WRA, California. In: Proceedings of the National Avian-Wind Power Planning Meeting III. LGL Ltd., Environmental Research Associates, Ontario, Canada (eds): 18-27.
- Cycleco, 2015. Analyse du cycle de vie de la production d'électricité d'origine éolienne en France. Rapport final. ADEME. <http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/impacts-environnementaux-eolien-francais-2015-rapport.pdf>.
- Dahl, L.E., Bevanger, K., Nygård, T., Røskoft, E., G.Stokke, B. 2012. Reduced breeding success in white-tailed eagles at Smøla windfarm, western Norway, is caused by mortality and displacement. *Biological Conservation* 145 (1): 79-85.
- Dai, K., Bergot, A., Liang, C., Xiang, W.-N. & Huang, Z. 2015. Environmental issues associated with wind energy – a review. *Renewable Energy* 75: 911-921.
- de Lucas, M., Janss, G.F.E., Whitfield, D.P. & Ferrer, M. 2008. Collision fatality of raptors in wind farms does not depend on raptor abundance. *Journal of Applied Ecology* 45 (6): 1695-1703.
- de Lucas, M., Ferrer, M., Bechard, M.J. & Muñoz, A.R. 2012. Griffon vulture mortality at wind farms in southern Spain: distribution of fatalities and active mitigation measures. *Biological Conservation* 147 (1): 184-189.
- Denzinger, A. & Schnitzler, H.-U. 2013. Bat guilds, a concept to classify the highly diverse foraging and echolocation behaviors of microchiropteran bats. *Frontiers in physiology* 4 (164).
- Desholm, M., Fox, A.D., Beasley, P.D.L. & Kahlert, J. 2006. Remote techniques for counting and estimating the number of bird wind turbine collisions at sea: a review. *Ibis* 148 (S1): 76-89.
- Devereux, C., Denny, M., & Whittingham, M. 2008. Minimal effects of wind turbines on the distribution of wintering farmland birds. *J. Appl. Ecol.* 45(6): 1689-1694. Doi: 10.1111/j.1365-2664.2008. 01560.x.
- Diffendorfer, J.E., Beston, J.A., Merrill, M.D., Stanton, J.C., Corum, M.D., Loss, S.R., Thogmartin, W.E. Johnson, D.H., Erickson, R.A. & Heist, K.W. 2015. Preliminary Methodology to Assess the National and Regional Impact of U.S. wind Energy Development on Birds and Bats.
- Dirksen, S., Spaans, A.L. & van der Winden, J. 1998. Studies on nocturnal flight paths and altitudes of waterbirds in relation to wind turbines: a review of current research in the Netherlands. In: Proceedings of National Avian – Wind Power Planning Meeting III, San Diego, California, USA. LGL Ltd., environmental research associates, King City, Ontario, Canada (eds). 13 p.
- Dokter, A.M., Liechti, F., Stark, H., Delobbe, L., Tabary, P. & Holleman, I. 2010. Bird migration flight altitudes studied by a network of operational weather radars. *Journal of The Royal Society Interface* 8 (54): 30-43.
- Dommanget, J.L. 1991. Un piège lumineux pour estimer la richesse des milieux aquatiques. *Insectes* 83 (4) : 17-19.
- Dooling, R. 2002. Avian hearing and the avoidance of wind turbines. Reported for National Renewable Energy Laboratory. NREL, Golden, Colorado, USA. 84 p.
- Dorka, U., Straub, F. & Trautner, J. 2014. Windkraft über Wald – kritisch für die Waldschneepfenbalz? *Naturschutz und Landschaftsplanung* 46 (3): 69-78.
- Doyle, J.M., Katzner T.E., Bloom P.H., Ji Y., Wijayawardena B.K. & DeWoody J.A. 2014. The Genome Sequence of a Widespread Apex Predator, the Golden Eagle (*Aquila chrysaetos*). *PLoS ONE* 9(4): e95599. Doi: 10.1371/journal.pone.0095599.
- Drewitt, A.L. & Langston, R.H.W. 2006. Assessing the impacts of wind farms on birds. *Ibis* 148 (S1): 29-42.
- Duriez O., Pilard P., Saulnier N., Bouzin M., Boudarel P. & Besnard A. 2018. Impact des mortalités additionnelles induites par les collisions avec les éoliennes pour la viabilité des populations de faucons crécerellette. *Actes du séminaire éolien et biodiversité*, 21 et 22 novembre 2017, Artigues-près-Bordeaux, France, LPO : 49-65.
- Dürr, T. & Bach, L. 2004. Bat deaths and wind turbines – a review of current knowledge, and of the information

- available in the database for Germany. *Bremer Beiträge für Naturkunde und Naturschutz* 7: 253-264.
- Dürr, T. 2009. Zur Gefährdung des Rotmilans *Milvus milvus* durch Windenergieanlagen in Deutschland. *Inf.-dienst Naturschutz Niedersachsen* 29: 185-191.
- Dürr, T. 2019. Fledermausverluste an Windenergieanlagen/ bat fatalities at wind turbines in Europe. <http://www.lfu.brandenburg.de/cms/detail.php/bb1.c.312579.de>.
- Enevoldsen, P. 2016. Onshore wind energy in Northern European forests: reviewing the risks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 60: 1251-1262.
- Ecoinvent, 2011. Ecoinvent 2.2: Swiss Centre for Life Cycle Inventories: Ecoinvent data v2.2 of 2011. Online database. Accessible at <http://db.Ecoinvent.org>.
- Erickson, W.P., Strickland, M.D., Johnson, G.D. & Kern, J.W., 2000. Examples of statistical methods to assess risk of impacts to birds from wind plants: 172-182. *In: Proceedings of National Avian-Wind Power Planning Meeting III*, San Diego, CA, May 1998. 202 p.
- Erickson, J.L. & West, S.D. 2002. The influence of regional climate and nightly weather conditions on activity patterns of insectivorous bats. *Acta Chiropterologica* 4 (1): 17-24.
- Erickson, W., Johnson, G., Young, D., Strickland, D., Good, R., Bourassa, M., Bay, K. & Sernka, K. 2002. Synthesis and comparison of baseline avian and bat use, raptor nesting and mortality information from proposed and existing wind developments. Reported for Bonneville Power Administration. BPA, Portland, Oregon, USA. 129 p.
- Erickson, W.P., Jeffrey, J., Kronner, K. & Bay, K. 2004. Stateline wind project wildlife monitoring final report, July 2001 – December 2003. Technical report peer-reviewed by and submitted to FPL Energy, the Oregon Energy Facility Siting Council, and the Stateline Technical Advisory Committee. 105 p.
- Erickson, W.P., Wolfe, M.M., Bay, K.J., Johnson, D.H., Gehring, J.L. 2014. A Comprehensive Analysis of Small-Passerine Fatalities from Collision with Turbines at Wind Energy Facilities. *PLoS ONE* 9(9): e107491. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0107491>.
- Eurobats. 2014. Eurobats – Guidelines for consideration of bats in wind farm projects revision 2014. *Eurobats Publications series* 6.
- EurObserv'ER. 2019. Baromètre éolien. EurObserv'ER, février 2017.
- Felber, G. & Stoeglehner, G. 2014. Onshore wind energy use in spatial planning – a proposal for resolving conflicts with a dynamic safety distance approach. *Sustainability and Society* 4 (22): 1-9.
- Ferreira, D., Freixo, C., Cabral, J.A., Santos, R. & Santos, M. 2015. Do habitat characteristics determine mortality risks for bats at wind farms? Modelling susceptible species activity patterns and anticipating possible mortality events. *Ecological Informatics* 28: 7-18.
- Ferrell, S.L. & DeVuyst, E.A. 2013. Decommissioning wind energy projects: an economic and political analysis. *Energy Policy* 53: 105-113.
- Ferrer, M., de Lucas, M., Janss, G.F.E., Casado, E. Muñoz, A.R., Bechard, M.J. & Calabuig, C.P. 2012. Weak relationship between risk assessment studies and recorded mortality in wind farms. *Journal of Applied Ecology* 49 (1): 38-46.
- Ferry, C. & Frochot, B. 1958. Une méthode pour dénombrer les oiseaux nicheurs. *La Terre et la vie* 105 (2) : 85-102.
- Fiedler, J.K., Henry, T.H., Tankersley, R.D. & Nicholson, C.P. 2007. Results of bat and bird mortality monitoring at the expanded Buffalo Mountain windfarm, 2005. Technical report for Tennessee Valley Authority. TVA, Knoxville, Tennessee, USA. 42 p.
- Fijn, R., Krijgsveld, K., Tijssen, W., Prinsen, H., & Dirksen, S. 2012. Habitat use, disturbance and collision risks for Bewick's Swans *Cygnus columbianus bewickii* wintering near a wind farm in the Netherlands. Eileen C. Rees (ed.), *Wildfowl* 62: 97-116.
- Fijn, R.C., Krijgsveld, K.L., Poot, M.J.M. & Dirksen, S. 2015. Bird movements at rotor heights measured continuously with vertical radar at a Dutch offshore wind farm. *Ibis* 157 (3): 558-566.
- Foo, C.F., Bennett, V.J., Hale, A.M., Korstian, J.M., Schildt, A.J. & Williams, D.A. 2017. Increasing evidence that bats actively forage at wind turbines. *PeerJ* 5:e3985.
- Frick, W.F., Baerwald, E.F., Pollock, J.F., Barclay, R.M.R., Szymanski, J.A., Weller, T.J., Russell, A.L., Loeb, S.C., Medellin, R.A. & McGuire, L.P. 2017. Fatalities at wind turbines may threaten population viability of a migratory bat. *Biological Conservation* 209: 172-177.
- From, S. & Söderman, G. 1997. Nature monitoring scheme. Guidelines to monitor terrestrial biodiversity in the Nordic countries. Nordic Council of Ministers (eds), Nord Environment, Copenhagen, Denmark. 73 p.
- Furmankiewicz, J. & Kucharska, M. 2009. Migration of bats along a large river valley in Southwestern Poland. *Journal of Mammalogy* 90 (6): 1310-1317.
- Garcia D.A., Canavero, G., Ardenghi, F., Zambon, M. 2015. Analysis of wind farm effects on the surrounding environment : Assessing population trends of breeding passerines. *Renewable Energy* 80 (2015) 190-196. http://www.ferasrl.it/wp-content/uploads/2015/03/2015_Analysis-of-wind-farm-effects-on-the-surrounding-environment.pdf.
- Garthe, S. & Hüppop, O. 2004. Scaling possible adverse effects of marine wind farms on seabirds: developing and applying a vulnerability index. *Journal of Applied Ecology* 41 (4): 724-734.
- Gartman, V., Bulling, L., Dahmen, M., Geißler, G. & Köppel, J. 2016a. Mitigation measures for wildlife in wind energy

- development, consolidating the state of knowledge – part 1: planning and siting, construction. *Journal of Environmental Assessment Policy and Management* 18 (3) 1650013. 45 p.
- Gartman, V., Bulling, L., Dahmen, M., Geißler, G. & Köppel, J. 2016b. Mitigation measures for wildlife in wind energy development, consolidating the state of knowledge – part 2: operation, decommissioning. *Journal of Environmental Assessment Policy and Management* 18 (2) 1650014. 31 p.
- Gehring, J., Kerlinger, P. & Manville II, A.M. 2009. Communication towers, lights, and birds: successful methods of reducing the frequency of avian collisions. *Ecological Applications* 19 (2): 505-514.
- Georgiakakis, P., Kret, E., Cárcamo, B., Doutau, B., Kafkaletou-Diez, A., Vasilakis, D. & Papadatou, E. 2012. Bat fatalities at wind farms in north-eastern Greece. *Acta Chiropterologica* 14 (2): 459-468.
- GIEC, 2011. Sources d'énergie renouvelable et atténuation du changement climatique. Résumé à l'intention des décideurs et résumé technique. Rapport spécial du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 242 p. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srren_report_fr-1.pdf.
- Giltsdorf, J.M., Hygnstrom, S.E. & VerCauteren, K.C. 2002. Use of frightening devices in wildlife damage management. *Integrated Pest Management Reviews* 7 (1): 29-45.
- Giordano M. 2017. Test de qualification du signal visuel « AIRBIRD - Rapaces » développé par Airbus. Rapport d'étude de la direction générale de l'Aviation civile. <http://www.stac.aviation-civile.gouv.fr/fr/publications/test-qualification-signal-visuel-airbird-rapaces-developpe-par-airbus>.
- Giovanello, A. & Kaplan, C.S. 2008. Wind energy siting handbook. Reported for American Wind Energy Association. AWEA, Washington, D.C., USA. 183 p.
- Gómez-Catasús, J., Garza, V., Traba, J. 2018. Wind farms affect the occurrence, abundance and population trends of small passerine birds: The case of the Dupont's lark. *J. Appl. Ecol.* 55 (4): 2033-2042. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13107>.
- González, M.A., García-Tejero, S., Wengert, E. & Fuertes, B. 2016. Severe decline in Cantabrian Capercaillie *Tetrao urogallus cantabricus* habitat use after construction of a wind farm. *Bird Conservation International* 26 (2): 256-261.
- Good, R.E., Erickson, W., Merrill, A., Simon, S., Murray, K., Bay, K. & Fritchman, C. 2011. Bat monitoring studies at the Fowler Ridge wind energy facility, Benton County, Indiana. Final report: April 13 – October 15, 2010. Prepared for Fowler Ridge Wind Farm, Fowler, Indiana. Prepared by Western EcoSystems Technology, Inc., Cheyenne, Wyoming, USA. 143 p.
- Good, R.E., Merrill, A., Simon, S., Murray, K.L. & Bay, K. 2012. Bat monitoring studies at the Fowler Ridge Wind Farm, Benton County, Indiana. Final report: April 1 – October 31, 2011. Prepared for Fowler Ridge Wind Farm, Fowler, Indiana. Prepared by Western EcoSystems Technology, Inc. Bloomington, Indiana, USA. 133 p.
- Good, R.E., Sonnenberg, M. & Simon, S. 2013. Bat evaluation monitoring studies at the Fowler Ridge Wind Farm, Benton County, Indiana. Final Report: August 1 – October 15, 2012. Prepared for Fowler Ridge Wind Farm, Fowler, Indiana. Prepared by Western EcoSystems Technology, Inc., Bloomington, Indiana, USA. 49 p.
- Good, R.E., Iskali, G. & Nasman, K. 2016. Bat evaluation monitoring studies at the Fowler Ridge Wind Farm, Benton County, Indiana: August 3 – October 14, 2015. Prepared for Fowler Ridge Wind Farm, Fowler, Indiana. Prepared by Western EcoSystems Technology, Inc., Bloomington, Indiana, USA. 36 p.
- Goodale, M.W. & Stenhouse, J.I. 2016. A conceptual model to determine vulnerability of wildlife populations to offshore wind energy development. *Human-Wildlife Interactions* 10(1):53-61. <https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1071&context=hwi>.
- Graitson, E. & Naulleau, G. 2005. Les abris artificiels : un outil pour les inventaires herpétologiques et le suivi des populations de reptiles. *Bulletin de la Société herpétologique de France* 115 : 5-22.
- Grajetzky, B., Nehls, G. 2010. Telemetric Monitoring of Montagu's Harrier in Schleswig-Holstein. In *Birds of Prey and Wind Farms*, pp. 97-148. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-53402-2_4.
- Grodsky, S.M., Behr, M.J., Gendler, A., Drake, D., Dieterle, 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.
- Groupe Chiroptères de la SFEPM. 2016a. Diagnostic chiroptérologique des projets éoliens terrestres. Actualisation 2016 des recommandations de la SFEPM, version 2.1 (février 2016). Société française pour l'étude et la protection des mammifères, Paris, France. 36 p.
- Groupe Chiroptères de la SFEPM. 2016b. Prise en compte des chiroptères dans la planification des projets éoliens, version 2.1 (février 2016). Société française pour l'étude et la protection des mammifères, Paris, France. 11 p.
- Groupe Chiroptères de la SFEPM. 2016c. Suivi des impacts des parcs éoliens terrestres sur les populations de chiroptères, version 2.1 (février 2016). Société française pour l'étude et la protection des mammifères, Paris, France. 17 p.
- Hanagasioglu, M., Aschwanden, J., Bontadina, F. & Puente Nilsson, M. de la. 2015. Investigation of the effectiveness of bat and bird detection of the DTBat and DTBird systems at Calandawind turbine. Reported for Federal

- Department of the Environment, Transport, Energy and Communications. FDETEC, Bern, Switzerland. 142 p.
- Hein, C.D., Gruver, J. & Arnett, E.B. 2013. Relating pre-construction bat activity and post-construction bat fatality to predict risk at wind energy facilities: a synthesis. A report submitted to the National Renewable Energy Laboratory. Bat Conservation International, Austin, Texas, USA.
- Hein, C. 2014. Strategies to reduce bat fatalities at wind energy facilities. Working together to resolve environmental effects of wind energy. In International Energy Agency's Wind Task 34 Webinar, 28-29 August 2014.
- Hein, C.D. & Schirmacher, M.R. 2016. Impact of Wind Energy on Bats: a Summary of our Current Knowledge, *Human-Wildlife Interactions* 10 (1): 19-27. <https://digitalcommons.usu.edu/hwi/vol10/iss1/4/>.
- Heitz, C. & Jung, L. 2017. Impact de l'activité éolienne sur les populations de chiroptères : enjeux et solutions (étude bibliographique). Rapport Écosphère. 149 p.
- Herter, D.R. & Hicks, L.L. 2000. Barred Owl and Spotted Owl populations and habitat in the central Cascade Range of Washington. *Journal of Raptor Research* 34 (4): 279-286.
- Hill, R., du Guesclin, P., Herring, M., McCarthy, M. & Smales, I. 2011. Managing cumulative wind farm impacts on the Brolga *Grus rubicunda* in Victoria, Australia: poster. In Conference on wind energy and wildlife impacts, 2-5 May 2011, Trondheim, Norway.
- Hipkiss, T., Moss, E. & Hörnfeldt, B. 2014. Variation in quality of Golden Eagle territories and a management strategy for wind farm projects in northern Sweden. *Bird Study* 61 (3): 444-446.
- Hodos, W. 2003. Minimization of motion smear: reducing avian collisions with wind turbines – period of performance: July 12, 1999 to August 31, 2002. Report NREL/SR-500-33249. National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, USA. 43 p.
- Hodos, W., Potocki, A., Storm, T. & Gaffney, M. 2001. Reduction of motion smear to reduce avian collisions with wind turbines. In: Proceedings of the National Avian-Wind Power Planning Meeting IV, 16-17 May 2000, Carmel, California, USA.
- Hoover, S., Morrisson, M., Thelander, C., & Rugges, D. 2001. Response of Raptors to Prey Distribution and Topographical Features at Altamont Pass Wind Resource Area, California. PNAWPPM IV, Proceeding of the National Avian-Wind Power Planning Meeting IV, Carmel, California: 16-22.
- Horn, J.W., Arnett, E.B., Jensen, M. & Kunz, T.H. 2008a. Testing the effectiveness of an experimental acoustic bat deterrent at the Maple Ridge wind farm. Report prepared for The Bats and Wind Energy Cooperative and Bat Conservation International. BCT, Austin, Texas, USA. 30 p.
- Horn, J.W., Arnett, E.B. & Kunz, T.H. 2008b. Behavioral responses of bats to operating wind turbines. *Journal of Wildlife Management* 72 (1): 123-132.
- Hötcker, H., Thomsen, K., & Köster, H. 2005. Auswirkungen regenerativer Energiegewinnung auf die biologische Vielfalt am Beispiel der Vögel und der Fledermäuse. Bonn, Germany: Bundesamt für Naturschutzbund (NABU).
- Hüppop, O., Dierschke, J., Exo, K.-M., Fredrich, E. & Hill, R. 2006. Bird migration studies and potential collision risk with offshore wind turbines. *Ibis* 148 (S1): 90-109.
- Huso, M., 2010. An estimator of wildlife fatality from observed carcasses – Environmetrics, Doi:10.1002/env.1052. 19 p.
- Huso, M.M., Dalthorp, D.H., Dail, D.A. & Madsen, L.J. 2015. Estimating wind-turbine caused bird and bat fatality when zero carcasses are observed. *Ecological Applications* 25 (5) : 1213-1225.
- Itty C., & Duriez, O., 2018. Le suivi par GPS, une méthode efficace pour évaluer l'impact des parcs éoliens sur des espèces à fort enjeux de conservation : l'exemple de l'aigle royal (*Aquila chrysaetos*) dans le sud du massif central. Actes du séminaire éolien et biodiversité, 21 et 22 novembre 2017, Artigues-près-Bordeaux, France, LPO : 42-48.
- Jangid, J., Bera, A.K., Joseph, M., Singh, V., Singh, T.P., Pradhan, B.K. & Das, S. 2016. Potential zones identification for harvesting wind energy resources in desert region of India – a multi criteria evaluation approach using remote sensing and GIS. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 65: 1-10.
- Johnson, G.D., Erickson, W.P., Strickland, M.D., Sheperd, M.F., Sheperd, D.A. & Sarappo, S.A. 2003. Mortality of bats at a large-scale wind power development at Buffalo Ridge, Minnesota. *The American Midland Naturalist* 150: 332-342.
- Johnson, G.D., Perlik, M.K., Erickson, W.P. & Strickland, M.D. 2004. Bat activity, composition, and collision mortality at a large wind plant in Minnesota. *Wildlife Society Bulletin* 32 (4): 1278-1288.
- Johnson, G.D., Strickland, M.D., Erickson, W.P. & Young, D.P. 2007. Use of date to develop mitigation measures for wind power development impacts to birds. In Birds and wind farms: risk assessment and mitigation, 1st edition, chapter: 14. Quercus Press, Madrid (pubs), de Lucas, M., Janss, G.FE. & Ferrer, M. (eds): 241-258.
- Johnson, J.B., Ford, W.M., Rodrigue, J.L. & Edwards, J.W. 2012. Effects of acoustic deterrents on foraging bats. Res. Note NRS-129. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station. U.S. DAFS, Newtown Square, Pennsylvania, USA. 5 p.
- Johnson, J.S., Watrous, K.S., Giumarro, G.J., Peterson, T.S., Boyden, S.A. & Lacki, M.J. 2011. Seasonal and geographic trends in acoustic detection of tree-roosting bats. *Acta Chiropterologica* 13 (1): 157-168.

- Johnston, A., Cook, A.S.C.P., Wright, L.J., Humphreys, E.M. & Burton, N.H.K. 2014. Modelling flight heights of marine birds to more accurately assess collision risk with offshore wind turbines. *Journal of Applied Ecology* 51 (1): 31-41.
- Jolivet, A., Kinda, B. & Mathias, D. 2015. Synthèse des connaissances de la communauté scientifique sur l'impact acoustique des projets éoliens *offshore* sur la faune marine. Rapport pour contribuer au débat public des projets éoliens *offshore* de Dieppe-Le Tréport et des îles d'Yeu et de Noirmoutier.
- Jones, G., Cooper-Bohannon, R., Barlow, K. & Parsons, K. 2009. Determining the potential ecological impact of wind turbines on bat populations in Britain - Phase 1 Final Report. Reported for Bat Conservation Trust. BCT, London, United Kingdom. 158 p.
- Kelm, D.H., Lenski, J., Kelm, V., Toelch, U. & Dziock, F. 2014. Seasonal bat activity in relation to distance to hedgerows in an agricultural landscape in central Europe and implications for wind energy development. *Acta Chiropterologica* 16 (1): 65-73.
- Kerckhof, F., Rumes, B., Norro, A., Houziaux, J.-S. & Degraer, S. 2012. A comparison of the first stages of biofouling in two offshore wind farms in the Belgian part of the North Sea. In Offshore wind farms in the Belgian part of the North Sea: Heading for an understanding of environmental impacts. In: Degraer, S., Brabant, R., Rumes, R. (Eds.), Royal Belgian institute of natural sciences, management unit of the North Sea mathematical models, Marine ecosystem management unit: 17-39.
- Kerlinger, P. 2000. An Assessment of the Impacts of Green Mountain Power Corporation's Seasburg, Vermont, Wind Power Facility on Breeding and Migrating and Wintering Bird: Preliminary results and Conclusions. PNAWPPM III, Proceeding of the National Avian-Wind Power Planning Meeting III, San Diego, California: 64-69.
- Kerlinger, P., Gehring, J.L., Erickson, W.P., Curry, R., Jain, A. & Guarnaccia, J. 2010. Night migrant fatalities and obstruction lighting at wind turbines in North America. *The Wilson Journal of Ornithology* 122 (4): 744-754.
- Kiesecker, J.M., Evans, J.S., Fargione, J., Doherty, K., Foresman, K.R., Kunz, T.H., Naugle, D., Nibbelink, N.P. & Niemuth, N.D. 2011. Win-win for wind and wildlife: a vision to facilitate sustainable development. *PLoS ONE* 6 (4): e17566.
- Korner-Nievergelt, F., Korner-Nievergelt, P., Behr, O., Niermann, I., Brinkmann, R. & Hellriegel, B. 2011. A new method to determine bird and bat fatality at wind energy turbines from carcass searches. *Wildlife Biology* 17 (4): 350-363.
- Korner-Nievergelt, F., Behr, O., Brinkmann, R., Etterson, M.A., Huso, M.M.P., Dalthorp, D., Korner-Nievergelt, P., Roth, T. & Niermann, I. 2015. Mortality estimation from carcass searches using the R-package carcass - a tutorial. *Wildlife Biology* 21 (1): 30-43.
- Korstian, J.M., Hale, A.M., Bennett, V.J. & Williams, D.A. 2016. Using DNA barcoding to improve bat carcass identification at wind farms in the United States. *Conservation Genetics Resources* 8: 27-34.
- Krijgsveld, K.L., Akershoek, K., Schenk, F., Dijk, F. & Dirksen, S. 2009. Collision risk of birds with modern large wind turbines. *Ardea* 97 (3): 357-366.
- Krone, R., Gutow, L., Joschko, T.J., & Schröder, A. 2013. Epi-fauna dynamics at an offshore foundation - implications of future wind power farming in the North Sea. *Marine Environmental Research* 85: 1-12.
- Kunz, T.H., Arnett, E.B., Erickson, W.P., Hoar, A.R., Johnson, G.D., Larkin, R.P., Strickland, M.D., Thresher, R.W. & Tuttle, M.D. 2007. Ecological impacts of wind energy development on bats: questions, research needs, and hypotheses. *Frontiers in Ecology and the Environment* 5 (6): 315-324.
- Kuvlesky Jr., W.P., Brennan, L.A., Morrison, M.L., Boydston, K.K., Ballard, B.M. & Bryant, F.C. 2010. Wind energy development and wildlife conservation: challenges and opportunities. *Journal of Wildlife Management* 71 (8): 2487-2498.
- Lack, D. 1963. Migration across the Southern North Sea studied by radar. Part 4: Autumn. *Ibis* 105: 1-54.
- Langgemach, T., & Dürr, T. 2013. Informationen über Einflüsse der Windenergienutzung auf Vogel. Nennhausen, Germany: Staatliche Vogelschutzwarte Brandenburg.
- Langston, R.H.W. & Pullan, J.D. 2003. Windfarms and birds: an analysis of the effects of windfarms on birds, and guidance on environmental assessment criteria and site selection issues. Report written by BirdLife International on behalf of the Bern Convention. BirdLife International, Cambridge, United Kingdom. 58 p.
- Larsen, J.K. & Madsen, J. 2000. Effects of wind turbines and other physical elements on field utilization by pink-footed geese (*Anser brachyrhynchus*): a landscape perspective. *Landscape Ecology* 15: 755-764.
- Larsen, J.K. & Guillemette, M. 2007. Effects of wind turbines on flight behaviour of wintering common eiders: implications for habitat use and collision risk. *Journal of Applied Ecology* 44 (3) : 516-522.
- Ledant, J.-P. 2006. Une méthode d'aide au choix de localisation des éoliennes selon leur impact présumé sur les oiseaux. *Aves* 43 (1) : 27-37.
- Leddy, K.L., Higgins, K.F. & Naugle, D.E. 1999. Effects of wind turbines on upland nesting birds in conservation reserve program grasslands. *The Wilson Bulletin*, 111 (1): 100-104.
- Lentini, P.E., Bird, T.J., Griffiths, S.R., Godinho, L.N. & Wintle, B.A. 2015. A global synthesis of survival estimates for microbats. *Biology Letters*, 11, 20150371.
- 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.

- Limpens, H.J.G.A., Boonman, M., Korner-Nievergelt, F., Jansen, E.A., van der Valk, M., La Haye, M.J.J., Dirksen, S. & Vreugdenhil, S.J. 2013. Wind turbines and bats in the Netherlands – Measuring and predicting. Report 2013.12 for Zoogdievereniging & Bureau Waardenburg. Zoogdievereniging, Nijmegen, the Netherlands. 120 p.
- Lind, O., Mitkus, M., Olsson, P. & Kelber, A. 2013. Ultraviolet sensitivity and colour vision in raptor foraging. *The Journal of Experimental Biology* 216: 1819-1826.
- Lintott, P.R., Richardson, S.Z., Hosken, D.J., Fensome, S.A. & Mathews, F. 2016. Ecological impact assessments fail to reduce risk of bat casualties at wind farms. *Current Biology* 26 (21): 1135-1136.
- Long, C.V., Flint, J.A., Lepper, P.A. & Dible, S.A. 2009. Wind turbines and bat mortality: interactions of bat echolocation pulses with moving turbine rotor blades. *In: Fifth International Conference on Bio-acoustics 2009*, 31st March-2nd April 2009, Loughborough. Proceedings of the Institute of Acoustics, 31 (1): 183-190.
- Long, C.V., Flint, J.A. & Lepper, P.A. 2010. Wind turbines and bat mortality: Doppler shift profiles and ultrasonic bat-like pulse reflection from moving turbine blades. *The Journal of the Acoustical Society of America* 128 (4): 2238-2245.
- 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.
- Łopucki, R., Klich, D. & Gierlerek, S. 2017. Do terrestrial animals avoid areas close to turbines in functioning wind farms in agricultural landscapes? *Environmental Monitoring and Assessment* 189: 343.
- Loss, S., Will, T., & Marra, P. 2013. Estimates of bird collision mortality at wind facilities in the contiguous United States. *Biological Conservation*, Vol. 168: 201-209.
- Lovich, J.E. & Ennen, J.R. 2013. Assessing the state of knowledge of utility-scale wind energy development and operation on non-volant terrestrial and marine wildlife. *Applied Energy* 103: 52-60.
- Lovich, J.E., Ennen, J.R., Madrak, S., Meyer, K., Loughran, C., Bjurlin, C., Arundel, T., Turner, W., Jones, C. & Groenendaal, G.M. 2011. Effects of wind energy production on growth, demography, and survivorship of a desert tortoise (*Gopherus agassizii*) population in Southern California with comparisons to natural populations. *Herpetological Conservation and Biology* 6 (2): 161-174.
- Lowther, S. 2000. Some Lessons from Case Studies. PNAWPPM III, Proceeding of the National Avian-Wind Power Planning Meeting III, San Diego, California: 115-124.
- LPO, 2004. L'Énergie éolienne et la conservation de la nature. LPO. 12 p.
- Madsen, J., & Boertmann, D. 2008. Animal behavioural adaptation to changing landscapes: spring-stating geese habituate to wind farms. *Landsc Ecol* 23(9), 1007-1011. Doi: 10.1007/s10980-008-9269-9.
- Maina, J.N. & King, A.S. 1984. Correlations between structure and function in the design of the bat lung: a morphometric study. *Journal of Experimental Biology* 111 (1): 43-61.
- Mammen, U., Mammen, K., Heinrichs, N. & Resetaritz, A. 2011. Red kite (*Milvus milvus*) fatalities at wind turbines: why do they occur and how they are to prevent? In Proceedings Conference on Wind energy and Wildlife impacts, Trondheim, Norway. NINA Report 693. Conference on Wind energy and Wildlife impacts, 2-5 May 2011. Norwegian Institute for Nature Research. Trondheim, Norway: 108.
- Manville II, A.M. 2005. Bird strikes and electrocutions at power lines, communication towers, and wind turbines: state of the art and state of the science – next steps toward mitigation. Report n°PSW-GTR-191. USDA Forest Service, Washington, D.C., USA. 14 p.
- Marques, A.T., Batalha, 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.
- Marques, A.T., Batalha, H., Rodrigues, S., Costa, H., Ramos Pereira, M.J., Fonseca, C., Mascarenhas, M., Bernardino, J., 2017. Wind turbines cause functional habitat loss in migratory soaring birds: results from a GPS tracking study with black kites. *CWW 2017*, Estoril, Portugal, 6-9 September.
- Martin, C. 2015. Effectiveness of operational mitigation in reducing bat mortality and an assessment of bat and bird fatalities at the Sheffield wind facility, Vermont. A master's thesis in Wildlife, Aquatic, and Wildlands Science and Management. Texas Tech University. 196 p.
- Martin, G.R. 2011. Understanding bird collisions with man-made objects: a sensory ecology approach. *Ibis* 153 (2): 239-254.
- Martin, G.R. & Shaw, J.M. 2010. Bird collisions with power lines: failing to see the way ahead? *Biological Conservation* 143 (11): 2695-2702.
- Martínez-Abraín, A., Tavecchia, G., Regan, H.M., Jiménez, J., Surroca, M. & Oro, D. 2012. Effects of wind farms and food scarcity on a large scavenging bird species following an epidemic of bovine spongiform encephalopathy. *Journal of Applied Ecology* 49 (1): 109-117.
- Marx, G. 2017. Le Parc éolien français et ses impacts sur l'avi-faune. Étude des suivis de mortalité réalisés en France de 1997 à 2015. LPO.
- Masden, E.A., Reeve, R., Desholm, M., Fox, A.D., Furness, W. & Haydon, D.T. 2012. Assessing the impact of marine wind farms on birds through movement modelling. *Journal of the Royal Society Interface* 9 (74) : 2120-2130.

- Mathews, F., Swindells, M., Goodhead, R.M., August, T.A., Hardman, P., Linton, D.M. & Hosken, D.J. 2013. Effectiveness of search dogs compared with human observers in locating bat carcasses at wind-turbines sites: a blinded randomized trial. *Wildlife Society Bulletin* 37 (1): 34-40.
- Mathews, F., Richardson, S., Lintott, P. & Hosken, D. 2016. Understanding the risk to European protected species (bats) at onshore wind turbine sites to inform risk management. Final report. University of Exeter, College of Life and Environmental Sciences, Exeter, United Kingdom. 127 p.
- May, R., Hamre, O., Vang, R. & Nygård, T. 2012. Evaluation of the DTBird video-system at the Smøla wind-power plant. Detection capabilities for capturing near-turbine avian behaviour. Report by Norwegian Institute for Nature Research (NINA). NINA Report 910. 27 p.
- 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.
- May, R., Åström, J., Hamre, Ø. & Lie Dahl, E., 2017a. Do birds in flight respond to (ultra)violet lighting? *Avian Research* 8: 33. <https://doi.org/10.1186/s40657-017-0092-3>.
- May, R., Gill, A.B., Köppel, J., Langston, R.H.V., Reichenbach, M., Scheidat, M., Smallwood, S., Voigt, C.C., Hüppop, O. & Portman, M. 2017b. Future research directions to reconcile wind turbine-wildlife interactions. In: *Wind Energy and Wildlife Interactions*. Köppel, J. (eds): 255-276.
- Maynou, X., Martin, R. & Aranda, D. 2017. The role of small secondary biotopes in a highly fragmented landscape as habitat and connectivity providers for dragonflies (Insecta: Odonata). *Journal of Insect Conservation Online*. <https://link.springer.com/epdf/10.1007/s10841-017-9992-0>.
- Meddour, R. 2011. La Méthode phytosociologique sigmatiste ou braun-blanqueto-tüxenienne. Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, faculté des sciences biologiques et agronomiques, département des sciences agronomiques. 40 p. http://www.tela-botanica.org/sites/botanique/fr/documents/phytosocio/m%C3%A9thode_phytosociologique_Braun-Blanqueto-T%C3%BCxenienne_2011.pdf.
- Miao R., Ghosh P.N., Khanna M., Wang W., Rong J. 2019. Effect of wind turbines on bird abundance: A national scale analysis based on fixed effects models. *Energy Policy* 132: 357-366. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.04.040>.
- Millon, L., Julien, J.-F., Julliard, R. & Kerbiriou, C. 2015. Bat activity in intensively farmed landscapes with wind turbines and offset measures. *Ecological Engineering* 75: 250-257.
- Minderman, J., Fuentes-Montemayor, E., Pearce-Higgins, J.W., Pendlebury, C.J. & Park, K.J. 2014. Estimates and correlates of bird and bat mortality at small wind turbine sites. *Biodiversity and Conservation* 24 (3): 467-482.
- Minderman, J., Pendlebury, C.J., Pearce-Higgins, J.W. & Park, K.J. 2012. Experimental evidence for the effect of small wind turbine proximity and operation on bird and bat activity. *PLoS ONE* 7 (7): e41177. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0041177>.
- Minderman, J., Gillis, M.H., Daly, H.F. & Park, K.J. 2017. Landscape-scale effects of single- and multiple small wind turbines on bat activity. *Animal Conservation*.
- Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche, de la Ruralité et de l'Aménagement du territoire (MAAPRAT). 2012. Articles L. 141-1 et suivants du Code forestier, créés par l'ordonnance n° 2012-92 du 26 janvier 2012 relative à la partie législative du Code forestier. *Journal officiel* 0023, 27 janvier 2012 : 1549. https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?sessionId=EBEEB0889FC00E1F55E8F553E089BE3E.tpdila13v_2?cidTexte=JORFTEXTO000025213462&dateTexte=20170530.
- Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer (MEEDDM). 2009. Arrêté du 13 novembre 2009 relatif à la réalisation du balisage des éoliennes situées en dehors des zones grevées de servitudes aéronautiques. Non publié au *Journal officiel*. <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=LEGITEXT000021492354>.
- Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer (MEEDDM). 2010. Guide de l'étude d'impact sur l'environnement des parcs éoliens. Actualisation 2010. 191 p. http://www.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/guide_eolien_15072010.pdf.
- Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement (MEDDTL). 2011. Arrêté du 26 août 2011 relatif à la remise en état et à la constitution des garanties financières pour les installations de production d'électricité utilisant l'énergie mécanique du vent. *Journal officiel* 0198, 27 août 2011 : 14542. <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000024507415&categorieLien=id>.
- Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (MEDDE). 2014. Guide sur l'application de la réglementation relative aux espèces protégées pour les parcs éoliens terrestres, 32 p. https://eolien-biodiversite.com/IMG/pdf/guide_eolien_especes_protegees.pdf.
- Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (MEDDE). 2015. Protocole de suivi environnemental des parcs éoliens terrestres, 40 p. <http://www.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/Protocole%20de%20suivi%20environnemental.pdf>.
- Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer (MEEM). 2016. Guide relatif à l'élaboration des études d'impacts des projets de parcs éoliens terrestres, Direction générale de la prévention des risques (DGPR).

- 188 p. http://www.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/Guide_EIE_auto%20env_2017-01-24.pdf.
- Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer (MEEM). 2017. Article L. 515-44 du Code de l'environnement, créé par l'ordonnance n° 2017-80 du 26 janvier 2017 relative à l'autorisation environnementale. *Journal officiel* 0023, 27 janvier 2017. <https://www.legifrance.gouv.fr/affichCodeArticle.do?cidTexte=LEGITEXT000006074220&idArticle=LEGIARTI000033931439&dateTexte=&categorieLien=cid>.
- Ministère de la Transition écologique et solidaire (MTES). 2018. Protocole de suivi environnemental des parcs éoliens terrestres. Révision 2018, 40 p. https://eolien-biodiversite.com/IMG/pdf/protocole_de_suivi_revision_2018.pdf.
- Ministère du Logement, de l'Égalité des territoires et de la Ruralité (MLETR). 2015a. Articles L. 113-1 et L. 113-2, créés par l'ordonnance n° 2015-1174 du 23 septembre 2015 relative à la partie législative du livre I^{er} du Code de l'urbanisme. *Journal officiel* 0221, 24 septembre 2015 : 16803. <https://www.legifrance.gouv.fr/affichCode.do?cidTexte=LEGITEXT000031210297&idSectionTA=LEGIARTI000031212507&idTexte=LEGITEXT000006074075&dateTexte=20170530>.
- Ministère du Logement, de l'Égalité des territoires et de la Ruralité (MLETR). 2015b. Article L. 121-8, créé par l'ordonnance n° 2015-1174 du 23 septembre 2015 relative à la partie législative du livre I^{er} du Code de l'urbanisme. *Journal officiel* 0221, 24 septembre 2015 : 16803. https://www.legifrance.gouv.fr/affichCodeArticle.do;jsessionid=97F9A4B986F635F81249888490AD59EE.tpdila18v_3?idArticle=LEGIARTI000031210433&idTexte=LEGITEXT000006074075&dateTexte=20170311.
- Ministère du Logement, de l'Égalité des territoires et de la Ruralité (MLETR). 2015c. Article L. 121-12, créé par l'ordonnance n° 2015-1174 du 23 septembre 2015 relative à la partie législative du livre I^{er} du Code de l'urbanisme. *Journal officiel* 0221, 24 septembre 2015 : 16803. <https://www.legifrance.gouv.fr/affichCodeArticle.do?cidTexte=LEGITEXT000006074075&idArticle=LEGIARTI000031210441>.
- Mitchell-Jones, A.J. 2004. Bat mitigation guidelines. Report for English Nature. Natural England (formerly English Nature), Worcester, United Kingdom. 76 p.
- Mitchell-Jones, T. & Carlin, C. 2014. Bats and onshore wind turbines – interim guidance. Natural England Technical Information Note TIN051, third edition (21 May 2014). Natural England, Worcester, United Kingdom. 9 p.
- Moriguchi S., Mukai H., Komachi R., Sekijima T. 2019. Wind farm effects on migratory flight of swans and foraging distribution at their Stopover site. In Bispo R., Bernardino J., Coelho H., Lino Costa J. (eds) Wind energy and wildlife impacts. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05520-2_8.
- Motte, G., Kervyn, T. & Libois, R. 1998. Comparaison de deux techniques d'étude de l'utilisation de l'habitat par la sérotine commune (*Eptesicus serotinus*) : le radiopistage et la prospection avec un détecteur d'ultrasons hétérodyne. XXI^e colloque francophone de mammalogie, octobre 1997, Amiens. SFEPM, *Arvicola* : 25-28.
- Nageleisen, L.M. & Bouget, C. (coordinateurs) 2009. L'étude des insectes en forêt : méthodes et techniques, éléments essentiels pour une standardisation. Synthèse des réflexions menées par le groupe de travail « Inventaires entomologiques en forêt » (Inv.Ent.For.). *Les Dossiers forestiers* 19, Office national des forêts. ONF, Paris, France. 144 p.
- Nairn, R. 2011. Wind turbines and water birds – phase 1 final report – May 2011. Reported for Natura Environmental Consultants. NEA, Wicklow, Ireland. 17 p.
- National Wind Coordinating Collaborative Mitigation Subgroup (NWCCMS) & Rectenwald, J. 2007. Mitigation toolbox. Report of National Wind Coordinating Collaborative. NWCC, Washington, D.C., USA. 114 p.
- Nehls, G., Höschle, C., Kosarev, V., Brandt, M.J. & Diederichs, A. 2015. Applying the wireless detection system (WDS) – a real-time monitoring tool for harbour porpoise activity around construction sites. In: 21st Biennial Conference of the Society for Marine Mammalogy, December 2015, San Francisco, USA.
- Nicholls, B. & Racey, P.A. 2009. The aversive effect of electromagnetic radiation on foraging bats – a possible means of discouraging bats from approaching wind turbines. *PLoS ONE* 4 (7): e6246.
- Nicholls, B. & Racey, P.A. 2007. Bats avoid radar installations: could electromagnetic fields deter bats from colliding with wind turbines? *PLoS ONE* 2 (3): e297.
- Northrup, J.M. & Wittemyer, G. 2013. Characterising the impacts of emerging energy development on wildlife, with an eye towards mitigation. *Ecology Letters* 16 (1): 112-125.
- Obermeyer, B., Manes, R., Kiesecker, J., Fargione, J. & Sochi, K. 2011. Development by design: mitigating wind development's impacts on wildlife in Kansas. *PLoS ONE* 6 (10): e26698.
- Ödeen, A. & Håstad, O. 2013. The phylogenetic distribution of ultraviolet sensitivity in birds. *BMC Evolutionary Biology* 13 (36). 10 p.
- Olivier, A. & Mailet, G. 2013. Protocole commun d'inventaire des reptiles terrestres sur les Réserves naturelles. Groupe RNF « Amphibiens et Reptiles ». 8 p. http://www.reserves-naturelles.org/sites/default/files/fichiers/protocole_reptiles.pdf.
- Office national des forêts. 1995. Instruction 95 T 32 du 10 mai 1995 sur les réserves biologiques dirigées et séries d'intérêt écologique particulier, approuvée par les ministères chargés de l'Environnement et de l'Agriculture.

- Office national des forêts. 1998. Instruction 98 T 37 du 30 décembre 1998 sur les réserves biologiques intégrales, approuvée par les Ministères chargés de l'environnement et de l'agriculture.
- Paula, A., Santos, J., Cordeiro, A., Costa, H., Mascarenhas, M. & Reis, C. 2011a. Habitat management for prey recovery – an off-site mitigation tool for wind farms' impacts on top avian predators. In Conference on Wind energy and Wildlife Impacts, 2-5 May 2011, Trondheim, Norway.
- Paula, J., Leal, M.C., Silva, M.J., Mascarenhas, R., Costa, H. & Mascarenhas, M. 2011b. Dogs as a tool to improve bird-strike mortality estimates at wind farms. *Journal for Nature Conservation* 19 (4): 202-208.
- Pearce-Higgins, J., Stephen, L., Langston, R., & Bright, J. 2008. Assessing the cumulative impacts of wind farms on peatland birds: a case study of golden plover *Pluvialis apricaria* in Scotland. *Mires and Peat* 4.
- Pearce-Higgins, J., Stephen, L., Langston, R., Bainbridge, I., & Bullman, R. 2009. The distribution of breeding birds around upland wind farms. *J. Appl. Ecol.* 46(6): 1323-1331. Doi: 10.1111/j.1365-2664.2009.01715.x.
- Pearce-Higgins, J.W., Stephen, L., Douse, A., & Langston, R.H.W. 2012. Greater impacts of wind farms on bird populations during construction than subsequent operation: results of a multi-site and multi-species analysis. *Journal of Applied Ecology* 49 (2): 386-394.
- Péron, G., Hines, J.E., Nichols, J.D., Kendall, W.L., Peters, K.A. & Mizrahi, D.S. 2013. Estimation of bird and bat mortality at wind-power farms with superpopulation models. *Journal of Applied Ecology* 50 (4): 902-911.
- Péron, G., Fleming, C.H., Duriez, O., Fluhr, J., Itty, C., Lambertucci, S., Safi, K., Shepard, E.L.C. & Calabrese, J.M. 2017. The energy landscape predicts flight height and wind turbine collision hazard in three species of large soaring raptor. *Journal of Applied Ecology* May 2017, British Ecological Society, 54:6. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12909>.
- Perret, M., 2018. La prise en compte des enjeux relatifs à la biodiversité dans le cadre réglementaire français. *Actes du séminaire éolien et biodiversité, 21 et 22 novembre 2017*, Artigues-près-Bordeaux, France, LPO : 24-29.
- Peste, F., Paula, A., da Silva, L.P., Bernardino, J., Pereira, J., Mascarenhas, M., Costa, H., Vieira, J., Bastos, C., Fonseca, C. & Pereira, M.J.R. 2015. How to mitigate impacts of wind farms on bats? A review of potential conservation measures in the European context. *Environmental Impact Assessment Review* 51: 10-22.
- Pescador, M., J. Peris, S., Gomez Ramirez, J.I. 2018. Effectiveness of mitigation measures to avoid fatalities in the populations of lesser kestrel (*Falco naumanni*) at wind farms in Central-East Spain. Conference on Wind energy and Wildlife impacts. 6-8 septembre 2017. Estoril, Portugal. Book of abstract.
- Piorkowski, M.D., Farnsworth, A.J., Fry, M., Rohrbaugh, R.W., Fitzpatrick, J.W. & Rosenberg, K.V. 2012. Research priorities for wind energy and migratory wildlife. *The Journal of Wildlife Management* 76 (3): 451-456.
- Pruett, C.L., Patten, M.A. & Wolfe, D.H. 2009. Avoidance behavior by prairie grouse: implications for development of wind energy. *Conservation Biology* 23 (5): 1253-1259.
- Rasran, L., Dürr, T. & Hötter, H. 2010. Analysis of collision victims in Germany. In *Birds of Prey and Wind Farm: Analysis of Problems and Possible Solutions*, an international workshop, 21st and 22nd October 2008, Berlin: 26-30.
- Région Languedoc-Roussillon. 2013. Schéma régional éolien. ADEME. 27 p.
- Région Provence-Alpes-Côte d'Azur. 2012. Schéma régional éolien. 70 p. http://www.paca.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/SRE_PACA_-_version_finale_-_septembre_2012_cle7df2d1.pdf.
- Région Rhône-Alpes. 2012. Schéma régional éolien de la région Rhône-Alpes. DREAL. 146 p. http://www.auvergne-rhone-alpes.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/SRE_RA_-_v_approuvee_au_26-10-2012_2_cle1cc2cd-1.pdf.
- Richardson, W.J. 2000. Bird migration and wind turbines: migration timing, flight behaviour, and collision risk. In *Proceedings of National Avian – Wind Power Planning Meeting III*. LGL Ltd., Environm. Res. Associates (eds). NWCC, Washington, D.C., USA. 9 p.
- Riols-Loyrette, C. 2015. Impact de parcs éoliens sur un couple d'aigle royal *Aquila chrysaetos* dans les Corbières. *Ornithos* 22(4) : 196-207.
- Roberts, K.A. 1991. Field monitoring: confessions of an addict. In *Monitoring for Conservation and Ecology*, volume 3 of the series *Conservation Biology*. Chapman & Hall (pubs), Goldsmith, F.B. (eds): 179-211.
- Robson, P. 2011. Review of Hen Harrier breeding and flight activity near a windfarm in Argyll (poster). In: Conference on wind energy and wildlife impacts, 2-5 May 2011, Trondheim, Norway.
- Rodrigues, L., Bach, L., Dubourg-Savage, M.-J., Goodwin, J. & Harbush, C. 2008. Lignes directrices pour la prise en compte des chauves-souris dans les projets éoliens. *EUROBATS Publication Series 3* (version française). PNUE/EUROBATS Secretariat, Bonn, Germany. 55 p.
- Rodrigues, L., Bach, L., Dubourg-Savage, M.-J., Karapandža, B., Kovač, D., Kervyn, T., Dekker, J., Kepel, A., Bach, P., Collins, J., Harbusch, C., Park, J., Micevski, B. & Minderman, J. 2015. Guidelines for consideration of bats in wind farm projects – revision 2014. *EUROBATS Publication Series No. 6* (English version). UNEP/EUROBATS Secretariat, Bonn, Germany. 133 p.
- Roche H.-P., Valles F. & Goutorbe E. 2018. SafeWind Chiro. Évaluation de l'activité des chiroptères à proximité

- des éoliennes par vidéo détection. Actes du séminaire éolien et biodiversité, 21 et 22 novembre 2017, Artigues-près-Bordeaux, France, LPO : 74-80.
- Roeleke, M., Blohm, T., Kramer-Schadt, S., Yovel, Y. & Voigt, C.C. 2016. Habitat use of bats in relation to wind turbines revealed by GPS tracking. *Scientific Reports* 6: 28961.
- Rollins, K.E., Meyerholz, D.K., Johnson, G.D., Capparella, A.P. & Loew, S.S. 2012. A forensic investigation into the etiology of bat mortality at a wind farm: barotraumas or traumatic injury? *Veterinary Pathology* 49 (2): 362-371.
- Roscioni, F., Russo, D., Di Febbraro, M., Frate, L., Carranza, M.L. & Loy, A. 2013. Regional-scale modelling of the cumulative impact of wind farms on bats. *Biodiversity and Conservation* 22 (8): 1821-1835.
- Roux, D., Le Bot, A., Clément, J. & Tesson, J.-L. 2004. Impact des éoliennes sur les oiseaux. Synthèse des connaissances actuelles, conseils et recommandations. Techniques et faune sauvage, *Office national de la chasse et de la faune sauvage*, 35 p.
- Roux, D., Tran, M., & Gay, N. 2013. Suivi des oiseaux et des chiroptères sur un parc éolien. Comportement et mortalité à Bollène (84) entre 2009 et 2012. *Faune sauvage* 298: 10-16.
- Roy, D.B., Ploquin, E.F., Randle, Z., Risely, K., Botham, M.S., Middlebrook, I., Noble, D., Cruickshanks, K., Freeman, S.N. & Brereton, T.M. 2015. Comparison of trends in butterfly populations between monitoring schemes. *Journal of Insect Conservation* 19 (2): 313-324.
- Russell, D., Brasseur, S., Thompson, D., Hastie, G., Janik, V., & Aarts, G. 2014. Marine mammals trace anthropogenic structures at sea. *Curr Biol* 24(14), 638-639. Doi:10.1101/cshperspect.a002774.
- Rydell, J., Bach, L., Dubourg-Savage, M.-J., Green, M., Rodrigues, L. & Hedenström, A. 2010a. Bat mortality at wind turbines in northwestern Europe. *Acta Chiropterologica* 12 (2): 261-274.
- Rydell, J., Bach, L., Dubourg-Savage, M.-J., Green, M., Rodrigues, L. & Hedenström, A. 2010b. Mortality of bats at wind turbines links to nocturnal insect migration? *European Journal of Wildlife Research* 56 (6): 823-827.
- Rydell, J., Engström, H., Hedenström, A., Larsen, J., Pettersson, J., & Green, M. 2012. The effect of wind power on birds and bats. A synthesis. Stockholm Sweden: Swedish environmental Protection Agency (ed.).
- Rydell, J., Bogdanowicz, W., Boonman, A., Pettersson, S., Suchecka, E. & Pomorski, J.J. 2016. Bats may eat diurnal flies that rest on wind turbines. *Mammalian Biology* 81 (3): 331-339.
- Rydell, J., Nyman, S., Eklöf, J., Jones, G. & Russo, D. 2017. Testing the performances of automated identification of bat echolocation calls: a request for prudence. *Ecological Indicators* 78: 416-420.
- Šálek, M., Chrenkova, M. & Kipson, M. 2013. High population density of Little Owl (*Athene noctua*) in Hortobágy National Park, Hungary, Central Europe. *Polish Journal of Ecology* 61 (1): 1-165.
- Santos, H., Rodrigues, L., Jones, G. & Rebelo, H. 2013. Using species distribution modelling to predict bat fatality risk at wind farms. *Biological Conservation* 157: 178-186.
- Santos, M., Bastos, R., Travassos, P., Bessa, R., Repas, M. & Cabral, J.A. 2010. Predicting the trends of vertebrate species richness as a response to wind farms installation in mountain ecosystems of northwest Portugal. *Ecological Indicators* 10 (2): 192-205.
- Santos, M., Bastos, R., Ferreira, D., Santos, A., Barros, P., Travassos, P., Carvalho, D., Gomes, C., Vale-Gonçalves, H.M., Braz, L., Morinha, F., das Neves Paiva-Cardoso, M., Hughes, S.J. & Cabral, J.A. 2017. A spatial explicit agent based model approach to evaluate the performance of different monitoring options for mortality estimates in the scope of onshore windfarm impact assessments. *Ecological Indicators* 73: 254-263.
- Sanz-Aguilar, A., Sánchez-Zapata, J.A., Carrete, M., Benítez, J.R., Ávila, E., Arenas, R. & Donázar, J.A. 2015. Action on multiple fronts, illegal poisoning and wind farm planning, is required to reverse the decline of the Egyptian vulture in southern Spain. *Biological Conservation* 187: 10-18.
- Saraiva, T., Pacheco, C., Cangarato, R., Godino, A., Venade, D., Marques, L., Teixeira, N. & Veríssimo, J. 2017. Efficiency of RADAR-assisted wind turbines selective stop programs on migratory routes in SW Portugal. *Conference on Wind energy and Wildlife impacts*. Estoril, 6-8 September 2017. 37 p.
- Schaub, M. 2012. Spatial distribution of wind turbines is crucial for the survival of red kite populations. *Biological Conservation* 155: 111-118.
- Schuster, E., Bulling, L. & Köppel, J. 2015. Consolidating the state of knowledge: a synoptical review of wind energy's wildlife effects. *Environmental Management* 56 (2): 300-331.
- Schwarz, C.J. 2012. Design and Analysis of BACI Experiments. Simon Fraser University, Department of Statistics and Actuarial Science. October 14, 2012. 76 p. <http://people.stat.sfu.ca/~cschwarz/Stat-650/Notes/MyPrograms/BACI/BACITalk-2012-10-15-UBC/baci.pdf>.
- SDES, enquête n° 170, février 2019. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/publicationweb/170>.
- Sheppard, J.K., McGann, A., Lanzone, M., Walsh, A., Wallace, M. & Swaisgood, R. 2014. Curtailing avian impacts with wind turbines using GSM/GPS tracking telemetry that incorporates autonomous geofence alerts. In: National Wind Coordinating Collaborative Research Meeting X, 2-5 December 2014, Broomfield, Colorado, USA.
- Silva, R. 2009. Effet des conditions météorologiques sur l'activité de chasse des chiroptères. Master 1 : Écologie, Biodiversité et Évolution. Université Paris-Sud 11/Agro Paris Tech/MNHN, 36 p.

- Silva, C., Cabral, J.A., Hughes, S.J. & Santos, M. 2017. A modelling framework to predict bat activity patterns on wind farms: an outline of possible applications on mountain ridges of North Portugal. *Science of the Total Environment* 581-582: 337-349.
- Singh, K., Baker, E.D. & Lackner, M.A. 2015. Curtailing wind turbine operations to reduce avian mortality. *Renewable Energy* 78: 351-356.
- Singh, N.J., Moss, E., Hipkiss, T., Ecke, F., Dettki, H., Sandström, P., Bloom, P., Kidd, J., Thomas, S. & Hörnfeldt, B. 2016. Habitat selection by adult Golden Eagles *Aquila chrysaetos* during the breeding season and implications for wind farm establishment. *Bird study* 63 (2): 233-240.
- Skalak, S.L., Sherwin, R.E. & Brigham, R.M. 2012. Sampling period, size and duration influence measures of bat species richness from acoustic surveys. *Methods in Ecology and Evolution* 3 (3): 490-502.
- Smallwood, K., Rugges, L., Hoover, S., Morrisson, M., & Thelander, C. 2001. Intra-and Inter-Turbine String Comparison of fatalities to Animal Burrow Densities at Altamont Pass. PNAWPPM IV, Proceeding of the National Avian-Wind Power Planning Meeting IV, Carmel, California: 23-37.
- Smallwood, K.S. & Neher, L. 2004. Repowering the APWRA: forecasting and minimizing avian mortality without significant loss of power generation. California Energy Commission, PIER Energy-Related Environmental Research. CEE, Sacramento, California, USA. 28 p.
- Smallwood, K.S. & Thelander, C.G. 2004. Developing methods to reduce bird mortality in the Altamont Pass Wind Resource Area. Final report by BioResource consultants to the California Energy Commission, Public Interest Research-Environmental Area. CEE, Sacramento, California, USA. 363 p.
- Smallwood, K.S. & Thelander, C.G. 2005. Bird mortality at the Altamont Pass Wind Resource Area – March 1998 – September 2001. Subcontract report for the National Renewable Energy Laboratory. NREL, Golden, Colorado, USA. 411 p.
- Smallwood, K.S. 2007. Estimating wind turbine-caused bird mortality. *Journal of Wildlife Management* 71 (8): 2781-2791.
- Smallwood, K.S., Thelander, C.G., Morrison, M.L., Ruge, L.M. 2007. Burrowing owl mortality in the altamont pass wind resource area. *J Wildl Manag* 71(5):1513-1524. Doi: 10.2193/2006-307.
- Smallwood, K.S. & Karas, B. 2009. Avian and bat fatality rates at old-generation and repowered wind turbines in California. *Journal of Wildlife Management* 73 (7): 1062-1071.
- Smyth, K., Christie, N., Burdon, D., Atkins, J., Barnes, R. & Elliott, M. 2015. Renewables-to-reefs? – Decommissioning options for the offshore wind power industry. *Marine Pollution Bulletin* 90 (1-2): 247-258.
- Soufflot, J. 2010. Synthèse des impacts de l'éolien sur l'avifaune migratrice sur cinq parcs en Champagne-Ardenne.
- Soldatini, C., Albores-Barajas, Y.V., Torricelli, P. & Mainardi, D. 2007. Testing the efficacy of deterring systems in two gull species. *Applied Animal Behaviour Science* 110 (3-4): 330-340.
- Spanjer, G.R. 2006. Responses of the big brown bat, *Eptesicus fuscus*, to a proposed acoustic deterrent device in a lab setting. A report submitted to the Bats and Wind Energy Cooperative and the Maryland Department of Natural Resources. Bat Conservation International, Austin, Texas, USA. 12 p.
- Steinborn, H., Reichenbach, M., & Timmermann, H. 2011. Windkraft – Vögel – Lebensräume: Ergebnisse einer siebenjährigen Studie zum Einfluss von Windkraftanlagen und Habitatparametern auf Wiesenvögel. Nordstedt, Germany: ARSU GmbH (ed.).
- Steven, T., Hale, A., Karsten, K., & Bennett, V. 2013. An analysis of displacement from wind turbines in a wintering grassland bird community. *Biodivers Conserv* 22(8), 1755-1767. Doi: 10.1007/s10531-013-0510-8.
- Stewart-Oaten, A., Murdoch, W.W. & Parker, K.P. 1986. Environmental impact assessment: "pseudoreplication" in time? *Ecology* 67 (4): 929-940.
- Strickland, M., Young, D., Johnson, G., Derby, G., Erickson, W., & Kern, J. 2000. Wildlife Monitoring Studies for the Seawest Wind power Developmet, Carbon County, Wyoming. PNAWPPM III, Proceeding of the National Avian-Wind Power Planning Meeting III, San Diego, California: 55-63.
- Sutter, C., Martin, K. & Grandgent, C. 2012. Condor detection and alerting system. US National Wind Coordinating Collaborative (NWCC), Research Meeting IX. November 27-30, 2012, Denver, Colorado, USA.
- Syndicat des énergies renouvelables, France énergie éolienne, Société française pour l'étude et la protection des mammifères & Ligue pour la protection des oiseaux (SER-FEE-SFPEM-LPO). 2010. Protocole d'étude chiroptérologique sur les projets de parcs éoliens. Première étape : document de cadrage. SER/FEE/SFPEM/LPO, Paris. 8 p.
- Szewczak, J.M. & Arnett, E.B. 2008. Field test results of a potential acoustic deterrent to reduce bat mortality from wind turbines. Unpublished report, Bat Conservation International. BCI, Austin, Texas, USA. 14 p.
- Tack, J.D., Noon, B.R., Bowen, Z.H., Strybos, L., Fedy, B.C. 2017. No Substitute for Survival: Perturbation Analyses Using a Golden Eagle Population Model Reveal Limits to Managing for Take. Raptor Research Foundation. *Journal of Raptor Research*, 51(3) : 258-272. <https://doi.org/10.3356/JRR-16-32.1>.
- Tapiero, A. 2017. Plan national d'actions en faveur des chiroptères (2016-2025). 83 p. <https://www>.

- ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/PNA_Chiropteres_2016-2025.pdf.
- Tellería, J.L. 2009. Potential impacts of wind farms on migratory birds crossing Spain. *Bird Conservation International* 19 (2): 131-136.
- Thomas, P.J., Labrosse, A.K., Pomeroy, A.C. & Otter, K.A. 2011. Effects of weather on avian migration at proposed ridgeline wind energy sites. *Journal of Wildlife Management* 75 (4): 805-815.
- Tomé, R., Canário, F., Leitão, A.H., Pires, N. & Repas, M. 2017. Radar assisted shutdown on demand ensures zero soaring bird mortality at a wind farm located in a migratory flyway. In *Wind Energy and Wildlife Interactions - Presentations from the CWW 2015 Conference*, 10-12 March 2015, Berlin. First edition: 119-133.
- Turbill, C., Bieber, C. & Ruf, T. 2011. Hibernation is associated with increased survival and the evolution of slow life histories among mammals. *Proc. R. Soc. B*, 278, 3355-3363.
- Turvey, B. & Taylor, K. 2015. Spatial planning for onshore wind turbines – natural heritage considerations – guidance. Report for Scottish Natural Heritage. SNH, Inverness, Scotland. 21 p.
- UICN France, MNHN, LPO, SEOF & ONCFS. 2016. La Liste rouge des espèces menacées en France. Chapitre Oiseaux de France métropolitaine. Paris, France.
- U.S. Fish and Wildlife Service. 2012. Land-based wind energy guidelines. 82 p. https://www.fws.gov/ecological-services/es-library/pdfs/WEG_final.pdf.
- Valdez, E.W. & Cryan, P.M. 2013. Insect prey eaten by hoary bats (*Lasiurus cinereus*) prior to fatal collisions with wind turbines. *Western North American Naturalist* 73 (4): 516-524.
- Villegas-Patracca, R., Cabrera-Cruz, S.A. & Herrera-Alsina, L. 2014. Soaring migratory birds avoid wind farm in the isthmus of Tehuantepec, southern Mexico. *PLoS ONE* 9 (3); e92462.
- Voigt, C.C., Popa-Lisseanu, A.G., Niermann, I. & Kramer-Schadt, S. 2012. The catchment area of wind farms for European bats: a plea for international regulations. *Biological Conservation* 153: 80-86.
- 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.
- Walker, D., McGrady, M., McCuskie, A., Madders, M. & McLeod, D.R.A. 2005. Resident Golden Eagle ranging behaviour before and after construction of a windfarm in Argyll. *Scottish Birds* 25: 24-40.
- Wang, Sh., Wang Si. & Smith, P. 2015. Ecological impacts of wind farms on birds: questions, hypotheses, and research needs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 44: 599-607.
- Weller, T.J. & Baldwin, J.A. 2012. Using echolocation monitoring to model bat occupancy and inform mitigations at wind energy facilities. *The Journal of Wildlife Management* 76 (3): 619-631.
- Wilkinson, G. S. & South, J. M. 2002. Life history, ecology and longevity in bats. *Aging cell* 1 (2): 124-131.
- Williams, T.C., Williams, J.M., Williams, P.G. & Stokstad, P. 2001. Bird migration through a mountain pass studied with high resolution radar, ceilometers, and census. *The Auk* 118 (2): 389-403.
- Willmott, J.R., 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.
- Winder, V., Gregory, A., McNew, L., Hunt, L., Wisely, S., & Sandercock, B., 2014. Space use by female Greater Prairie-Chickens in response to wind energy development. *Ecosphere*.
- Xirouchakis S.M., Armeni E., Nikolopoulou S., Halley J. (2019). Estimating the Potential Mortality of Griffon Vultures (*Gyps fulvus*) Due to Wind Energy Development on the Island of Crete (Greece). *Wind Energy and Wildlife Impacts*: 205-222. Doi:10.1007/978-3-030-05520-2_13.
- Young, D.P., Erickson, W.P., Strickland, M.D., Good, R.E. & Sernka, K.J. 2003. Comparison of avian responses to UV-light-reflective paint on wind turbines. Subcontract report July 1999 – December 2000. National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, USA. 67 p.
- Zahn, A., Rogrigues, L., Rainho, A. & Palmerim, J. M., 2007. Critical times of the year for *Myotis myotis*, a temperate zone bat : roles of climate and food resources. *Acta Chiropterologica* 9(1): 15-125.
- Zeiler, H. & Gruenschachner-Berger, V. 2009. Impact of wind power plants on black grouse, *Lyrurus tetrix* in Alpine regions. *Folia Zoologica -Praha-* 58(2): 173-182.
- 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.
- Zimmerling, J.R., Francis, C.M. 2016. Bat mortality due to wind turbines in Canada: Bats and Wind Turbines. *Journal of Wildlife Management* 10.1002/jwmg.21128.

Table des tableaux et figures

Tableau 1	Tendance évolutive des populations de chiroptères en France	41
Tableau 2	Calendrier indicatif des périodes favorables aux inventaires de terrain	61
Figure 1	Évolution de la puissance éolienne installée en France	17
Figure 2	Localisation des parcs éoliens français en fonction du gisement éolien au 1 ^{er} avril 2016.....	19
Figure 3	Implantation des parcs au cours du temps	20
Figure 4	Puissance éolienne installée dans l'Union européenne fin 2018 (en MW)	21
Figure 5	Composantes d'un parc éolien.....	22
Figure 6	Taux d'émission de gaz à effet de serre, en gCO ₂ /kWh	28
Figure 7	Fréquentation de l'aire de l'étude (carrés de 250 m de côté) par l'aigle royal <i>Aquila chrysaetos</i> et localisation des éoliennes pour la période 1998-2000 (avant la construction du parc éolien) puis de 2001 à 2004	35
Figure 8	Principales espèces retrouvées sous les éoliennes françaises entre 1997 et 2015, statuts de protection et de conservation	38
Figure 9	Nombre et classification par ordre et par famille des oiseaux retrouvés sous les éoliennes françaises entre 1997 et 2015.....	39
Figure 10	Nombre de cadavres de chiroptères recensés au pied des éoliennes en Europe entre 2003 et 2016 ..	44
Figure 11	Concentration des passages migratoires lors du franchissement d'un relief	56
Figure 12	Le principe BACI, contrôle de l'impact sur un site	61
Figure 13	Quelques mesures permettant de mitiger les impacts lors de la disposition des machines sur le site.....	69
Figure 14	Les paramètres liés aux machines et pouvant influencer les risques de collision avec la faune	71
Figure 15	Les mesures à prendre lors du chantier de construction pour éviter les dommages sur le milieu, la faune et la flore sauvages	73
Figure 16	Activité des chiroptères en fonction de différents paramètres environnementaux	81
Figure 17	Superposition de l'activité chiroptérologique en hauteur et de la production énergétique nette de plusieurs modèles d'éoliennes (44 à 126 m de hauteur de nacelle) en fonction de la vitesse du vent d'avril à octobre 2011 et 2012	83
Figure 18	Méthodes d'asservissement des machines pour limiter les collisions avec l'avifaune et les chiroptères	86

Table des matières

Sommaire	5
Remerciements	6
Liste des sigles et acronymes	7
Résumé	8
Abstract	9
Avant-propos	10
Introduction – Pourquoi une telle synthèse ?	13



Contexte éolien en France et en Europe	15
1.1 Transition énergétique	16
1.2 Objectifs européens et nationaux	17
1.2.1 En France	17
1.2.2 Dans l'Union européenne	18
1.3 État des lieux des parcs français et européen	19
1.3.1 En France	19
1.3.2 Dans le reste de l'Europe	21
1.4 Cadre réglementaire	22
1.4.1 Définition d'un parc éolien	22
1.4.2 Planification	22
1.4.3 Réglementation concernant les éoliennes	23



Impacts de l'éolien sur la biodiversité	27
2.1 Impacts positifs sur l'environnement	28
2.2 Impacts négatifs	29
2.2.1 Impacts sur les habitats	29
2.2.1.1 Impacts directs	30
2.2.1.2 Impacts indirects	33
2.2.2 Impacts sur les oiseaux	33
2.2.2.1 Dérangement	33
Attraction, répulsion, habituation	33
Perte ou modification d'habitat	34
Effet « barrière »	36
2.2.2.2 Collision	36
Quantité	37
Espèces	38
Facteurs d'impact	39
2.2.3 Impacts sur les chiroptères	41
2.2.3.1 Sensibilité des populations	41

2.2.3.2	Dégradation des habitats	42
	Pertes par destruction	42
	Pertes par aversion	43
2.2.3.3	Mortalité directe	43
	Barotraumatismes	47
	Phénomène d'attraction	47



3 Atténuation des impacts sur la biodiversité 51

3.1 Pré-diagnostic : recherche de l'emplacement du site 52

3.1.1 Documents guides 52

3.1.2 Compatibilité avec la réglementation des aires naturelles 53

3.1.2.1 Zonage excluant l'implantation d'éoliennes 53

3.1.2.2 Zonage n'excluant pas l'éolien *a priori* 54

3.1.3 Habitats et autres aires à prendre en compte 55

3.2 Phase de diagnostic : l'étude d'impact 59

3.2.1 Cadrage préalable : les aires d'étude 59

3.2.2 Définir l'état initial 60

3.2.2.1 Recherches bibliographiques 60

3.2.2.2 Prospections de terrain 60

3.2.2.3 Évaluation des enjeux et sensibilités 64

3.2.3 Définir les impacts 64

3.2.4 Mettre en place des mesures d'atténuation 65

3.2.4.1 Mesures en phase de développement du projet 66

Disposition des machines sur le site 66

Caractéristiques des machines 68

3.2.4.2 Mesures en phase de chantier 72

3.2.4.3 Mesures en phase d'exploitation 73

Diminuer l'attractivité du site 74

Augmenter l'attractivité des habitats à proximité 75

Effarouchement des animaux 76

Asservissement des machines 79

3.2.4.4 Mesures pour extension et renouvellement 87

3.2.4.5 Mesures en phase de démantèlement 88

3.2.5 Assurer les suivis post-implantation 89

3.2.5.1 Suivi de la mortalité 89

3.2.5.2 Suivi de l'activité 92

3.2.5.3 Suivi des habitats naturels 92

3.2.5.4 Conclusion du suivi post-implantation 93

3.3 Éolien en mer 94

3.4 Conclusion 95



4 Conclusion générale 97

Annexes

Bibliographie 102

Table des tableaux et figures 117

Conception/Maquette : Transfaire – contact@transfaire.com

Impression : JOUVE

ISBN : 978-2-85692-103-6

Dépôt légal : septembre 2019

Imprimé sur papier issu de forêts durablement gérées
et par un imprimeur certifié Imprim'Vert

L'énergie éolienne, destinée à se substituer à des énergies polluantes, émettrices de gaz à effet de serre ou présentant de forts risques pour l'environnement, peut, elle aussi, avoir divers impacts sur la faune, la flore et les habitats. Ceux-ci peuvent être évités, réduits ou parfois compensés.

Cette synthèse tente de mieux caractériser ces impacts et leurs facteurs d'influence, et de mettre en avant les méthodes et technologies utilisées pour les atténuer.

