

**LA RÉDUCTION
DES IMPACTS SUR
LA BIODIVERSITÉ
DES PARCS ÉOLIENS
TERRESTRES ET MARINS**



RÉDACTION

Paul Bonfils, chargé de mission « Énergies renouvelables et biodiversité » (Comité français de l'UICN).

COORDINATION

Florence Laviussière, responsable « Écosystèmes » (Comité français de l'UICN), Jean-François Sys, chargé de mission « Biodiversité marine » (Comité français de l'UICN), Thomas Eglin (Ademe), Véronique de Billy (OFB), Didier Grosdemange (Gaïa Terre Bleue), Antoine Chabrolle (MNHN), Bertrand Schatz (CEFE-CNRS), Paul Franc (Ademe) et Frédérick Herpers (Stratégies Marines).

DIRECTION

Sébastien Moncorps, Directeur (Comité français de l'UICN).

REMERCIEMENTS

- aux dix porteurs de projets ayant répondu à l'appel à retours d'expérience du Comité français de l'UICN concernant les mesures de réduction d'impacts sur la biodiversité des projets éoliens terrestres et marins.
- aux membres des groupes thématiques « Énergies renouvelables, occupation du sol et biodiversité » et « Énergies marines renouvelables » ainsi qu'aux chercheurs et experts sollicités pour leur relecture de ce document.

CITATION DE L'OUVRAGE

Comité français de l'UICN (2026). *La réduction des impacts sur la biodiversité des parcs éoliens terrestres et marins*. Paris, France.

DÉPÔT LÉGAL : Février 2026.

ISBN : 978-2-493318-33-6

Cet ouvrage est en libre téléchargement sur le site internet du Comité français de l'UICN, Thématique Énergies renouvelables : www.uicn.fr

La reproduction à des fins non commerciales, notamment éducatives, est permise sans autorisation écrite à condition que la source soit dûment citée. La reproduction à des fins commerciales et notamment en vue de la vente, est interdite sans permission écrite préalable du Comité français de l'UICN.

CRÉDITS PHOTOGRAPHIQUES COUVERTURE

© Paul Bonfils, © Freepik, © Aurélien Audevard.

CONCEPTION GRAPHIQUE

Caroline Rampon – www.laplittefabrikdecom.fr

Les opinions exprimées dans la présente brochure n'engagent que le Comité français de l'UICN. Elles ne sauraient refléter la position individuelle des organismes partenaires de cette étude, des personnes et organismes consultés, ou de chaque membre des groupes thématiques « Énergies renouvelables, occupation du sol et biodiversité » et « Énergies marines renouvelables » du Comité français de l'UICN.

CETTE PUBLICATION A BÉNÉFICIÉ DU SOUTIEN FINANCIER DE :



Fonds AXA pour le Progrès humain
Le fonds de dotation des Mutuelles d'Assurances et du Groupe AXA



Avant-propos

Afin de contribuer à la lutte contre le changement climatique et de limiter ses conséquences – déjà visibles – sur nos sociétés, de nombreux pays se sont engagés à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre voire à atteindre la neutralité carbone. C'est le cas de la France qui s'est fixée des objectifs en ce sens à l'horizon 2050. Pour répondre à cette ambition et garantir un accès pérenne aux ressources énergétiques, une stratégie s'impose : des usages plus sobres et décarbonés.

Le Comité français de l'UICN soutient le développement des énergies renouvelables comme levier d'atténuation du changement climatique et de sécurisation de l'approvisionnement énergétique français. Tandis que cette transition énergétique doit s'accélérer dans les prochaines années, le Comité français appelle cependant à la vigilance. La plus grande précaution est de mise vis-à-vis des enjeux de biodiversité, qui doivent être systématiquement pris en compte dans la planification et le développement de chaque projet. En effet, le développement des énergies renouvelables, comme tout aménagement du territoire, peut avoir des impacts significatifs sur la faune et la flore, les habitats naturels, leurs fonctions écologiques et les services écosystémiques associés. Or, la lutte contre le changement climatique n'a de sens que si elle va de pair avec la préservation et la restauration des milieux naturels. Les meilleures garanties d'atténuation et d'adaptation au changement climatique sont en effet des écosystèmes en bonne santé.

Avec le soutien de l'Ademe, du Ministère de la Transition écologique, de la Biodiversité et des Négociations internationales sur le Climat et la Nature, du Fonds AXA pour le Progrès Humain, de la Fondation Crédit Mutuel Alliance Fédérale et d'Engie Green France, le Comité français de l'UICN et son réseau de membres et d'experts se mobilisent pour faciliter le dialogue et le partage de connaissances entre les différents acteurs de la transition énergétique et de la conservation de la nature.

Ce recueil s'inscrit dans cette démarche. En rassemblant des retours d'expérience concrets confrontés aux connaissances scientifiques, il se veut à la fois témoignage et appel à mieux écouter la voix de la science. Son ambition est d'accompagner la réflexion et le travail de la filière éolienne, d'éclairer la décision des pouvoirs publics et de donner des points de repère et d'inspiration, afin de faire évoluer les pratiques pour une meilleure conciliation entre le développement des énergies renouvelables et la préservation de la biodiversité.

Sommaire

CONTEXTE p. 4

Le rôle de l'énergie éolienne dans l'atténuation du changement climatique..... p. 5

- Le changement climatique engendre des impacts sur l'ensemble des écosystèmes et des sociétés humaines p. 5
- L'énergie éolienne, un outil efficace de transition énergétique p. 5
- La politique énergétique française porte une forte ambition de développement de l'éolien dans les années à venir p. 7

Le développement de l'éolien doit se faire dans le respect des objectifs de préservation de la biodiversité p. 8

- La biodiversité connaît une crise majeure en raison des activités humaines, convergeant avec la crise climatique p. 8
- Les éoliennes représentent un facteur de risque supplémentaire pour la biodiversité..... p. 9

Des solutions existent pour limiter l'impact de l'énergie éolienne sur les écosystèmes p. 15

- La réglementation française encadre le développement des énergies renouvelables au regard des enjeux environnementaux p. 15
- Dès la planification et la conception des projets éoliens, une bonne prise en compte de la biodiversité doit permettre d'éviter efficacement une partie des impacts environnementaux p. 18
- La réduction des impacts dans les projets éoliens p. 19

ÉCLAIRAGES & RETOURS D'EXPÉRIENCES p. 22

La réduction des risques de mortalité des chiroptères par les mesures de bridage des éoliennes terrestres..... p. 23

La réduction des risques de collision de l'avifaune par les mesures de bridage prédictif p. 30

Les systèmes de détection automatique de l'avifaune (SDA) p. 37

La réduction du bruit sous-marin en phase de chantier est incontournable dans les projets éoliens en mer p. 43

PISTES DE RECHERCHE POUR RÉDUIRE LES MORTALITÉS DE LA FAUNE VOLANTE p. 48

RECOMMANDATIONS p. 50

BIBLIOGRAPHIE p. 52



Parc éolien des îles d'Yeu et Noirmoutier © Paul Bonfils

CONTEXTE

LE RÔLE DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE DANS L'ATTÉNUATION DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

LE CHANGEMENT CLIMATIQUE ENGENDRE DES IMPACTS SUR L'ENSEMBLE DES ÉCOSYSTÈMES ET DES SOCIÉTÉS HUMAINES

En 2024, les niveaux de dioxyde de carbone atmosphérique ont atteint un record de 427 ppm (parties par million, soit 0,0427 %), augmentant à un rythme inédit depuis le début des mesures de la concentration de ce gaz dans les années 1950. Les conséquences en sont multiples et interdépendantes. La planète a connu une augmentation de température moyenne de plus de 1,1°C depuis l'ère préindustrielle, provoquant déjà des phénomènes climatiques extrêmes et une modification de nombreux milieux naturels qui affectent la sécurité alimentaire, l'accès à l'eau, la santé humaine et augmentent le risque d'extinction d'espèces et la disparition des services rendus par les écosystèmes¹. Pour limiter ces impacts, des réductions drastiques et rapides des émissions de gaz à effet de serre sont nécessaires.

Le changement climatique est principalement causé par l'augmentation des émissions de gaz à effet

de serre², provenant de la combustion des énergies fossiles, de la déforestation et des pratiques agricoles – responsables non seulement de l'émission de dioxyde de carbone (CO₂), mais aussi d'autres gaz à fort potentiel d'effet de serre, comme le méthane ou le protoxyde d'azote. Les émissions globales des différents secteurs sont chiffrées en les ramenant en tonnes d'équivalent CO₂, qui comprennent également les autres molécules.

Également, l'importance de la sobriété énergétique ne semble pas suffisamment considérée. Celle-ci est pourtant un levier simple et performant pour réduire les émissions de gaz à effet de serre et les impacts des sociétés humaines. La transition énergétique en faveur des énergies renouvelables et la sobriété des usages doivent donc être considérées comme une priorité dans les politiques publiques d'investissement et de soutien à l'innovation.

L'ÉNERGIE ÉOLIENNE, UN OUTIL EFFICACE DE TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

A l'échelle mondiale, la production d'électricité est le premier secteur émetteur de CO₂, représentant 42 % du total des émissions³, en raison de la combustion de charbon, de fioul ou de gaz dans les centrales thermiques présentes dans la plupart des pays du monde. La transition énergétique est donc un outil majeur d'atténuation du changement climatique, en promouvant le déploiement de capacités de production électrique renouvelables, en particulier les technologies solaires ou éoliennes.

Ces sources d'énergie ont un bilan climatique largement positif et nettement meilleur à celui des énergies fossiles. Les énergies renouvelables présentent par ailleurs un intérêt majeur en termes économiques, géopolitiques et de santé publique ; en effet leur développement permet d'exploiter localement des sources d'énergie largement répandues donc de limiter le déficit commercial, d'améliorer la souveraineté énergétique des pays privés de réserves d'hydrocarbures, et de réduire les pollutions issues

1. Les services écosystémiques sont définis comme les avantages que les écosystèmes procurent aux humains, sous différentes formes telles que la production de l'oxygène de l'air, l'épuration naturelle des eaux, la pollinisation des cultures, la séquestration naturelle du carbone ou encore le recyclage des nutriments.

2. IPCC, 2023.
3. AIE, 2022.

de leur extraction, transformation, transport et combustion. En France, la production électrique est largement décarbonée, grâce au parc nucléaire et aux capacités renouvelables déjà en exploitation, tandis que le mix énergétique primaire est encore composé d'environ 40 % d'énergies fossiles (principalement du pétrole et du gaz)⁴. La transition énergétique consiste donc avant tout à diminuer les consommations d'énergie en mettant en place des politiques de sobriété et d'efficacité énergétiques, et à remplacer les énergies fossiles par des énergies faiblement carbonées, ce qui nécessite entre autres d'investir dans l'électrification des usages.

Les éoliennes convertissent l'énergie cinétique du vent en électricité grâce à des turbines. Les progrès technologiques actuels permettent des rendements de plus en plus élevés, avec les plus grandes machines installées en mer atteignant aujourd'hui des puissances de 20 MW⁵. Ces innovations réduisent les coûts d'installation et ouvrent la possibilité d'exploiter

le potentiel du vent là où de plus petites turbines n'étaient pas rentables et d'augmenter la production d'électricité, en particulier pour l'éolien en mer où les vents sont plus constants. Le bilan carbone des éoliennes est très faible, estimé à environ 14 g_{éqCO2}/kWh pour une éolienne terrestre et 16 g_{éqCO2}/kWh pour une éolienne en mer, tandis que pour les énergies fossiles celui-ci monte à 418 g_{éqCO2}/kWh dans une centrale à gaz, 730 g_{éqCO2}/kWh pour une centrale au fioul et 1060 g_{éqCO2}/kWh pour une centrale à charbon⁶. Par ailleurs, l'énergie éolienne est de plus en plus compétitive, avec un coût de production moyen ayant baissé de 39 % entre 2012 et 2022 en France, pour se stabiliser autour de 60 €/MWh⁷.

Pour l'éolien en mer, si le coût est plus élevé que le terrestre en raison de contraintes techniques plus importantes, le potentiel de production est considérable grâce à un vent plus constant et des machines plus grandes capables de mieux exploiter la ressource.



Vanneaux huppés et Pluviers dorés © Alexandre Bertheau

4. SDES, 2025.

5. L'éolienne MySE 18.X-20MW, du constructeur chinois Mingyang Smart Energy, installée en août 2024 dans la province de Hainan, produit l'équivalent de la consommation de 20 600 foyers français avec un facteur de charge de 50 %.

6. Base de données Empreinte, Ademe.

7. Ademe, 2024.

LA POLITIQUE ÉNERGÉTIQUE FRANÇAISE PORTE UNE FORTE AMBITION DE DÉVELOPPEMENT DE L'ÉOLIEN DANS LES ANNÉES À VENIR

.....

Dans sa lutte contre le changement climatique, l'Union européenne s'est fixé l'objectif de réduire ses émissions de gaz à effet de serre de 55 % en 2030 par rapport au niveau de 1990. Dans ce cadre, la France s'est dotée d'outils de pilotage pour conduire sa politique de transition énergétique ; il s'agit de la Stratégie nationale bas-carbone (SNBC) et de la Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE). Tandis que la SNBC vise à définir la feuille de route en matière d'atténuation à long terme pour l'ensemble des secteurs, la PPE permet de décrire précisément les orientations de la politique énergétique sur les dix années à venir. Cet enjeu est incontournable, puisque la production et la consommation d'énergie représentent environ 70 % des émissions de gaz à effet de serre en France⁸. La PPE porte donc la stratégie de décarbonation du mix énergétique français, qui s'appuie sur la réduction des consommations, l'électrification des usages (transport, chauffage, industrie) et le développement des énergies bas-carbone pour répondre à cette hausse de demande électrique à venir. Elle prévoit un niveau de production d'électricité décarbonée d'au moins 650 TWh d'ici à 2035, provenant principalement des filières renouvelables, soit une augmentation de 42 % par rapport à la production d'électricité décarbonée en 2023. Ceci implique, pour l'éolien terrestre, de tenir un rythme de déploiement d'environ 1,3 GW/an et pour l'éolien en mer, de viser 15 GW de puissance installée en 2035 (pour 1,4 GW en service et 1,5 GW en construction actuellement). Pour l'éolien en mer, le déploiement s'effectue au terme d'appels d'offres sur des zones identifiées par l'Etat en concertation avec les acteurs du territoire et soumises à la consultation du public dans le cadre de la planification des espaces maritimes par façades. Afin de sécuriser la trajectoire à 2035, la PPE 2026-2035 prévoit notamment d'attribuer de l'ordre de 8 à 10 GW supplémentaires d'ici fin-2026 avec le lancement d'un appel d'offres de grande capacité. D'ici à 2030, l'Etat envisage de lancer plusieurs appels d'offres pour des puissances équivalentes visant un objectif d'au moins 26 GW en service en 2040 et d'au moins 45 GW en 2050.



© Pixabay

.....
8. Citepa, inventaire CNUCC 2023.

LE DÉVELOPPEMENT DE L'ÉOLIEN DOIT SE FAIRE DANS LE RESPECT DES OBJECTIFS DE PRÉSERVATION DE LA BIODIVERSITÉ



LA BIODIVERSITÉ CONNAÎT UNE CRISE MAJEURE EN RAISON DES ACTIVITÉS HUMAINES, CONVERGEANT AVEC LA CRISE CLIMATIQUE

.....

La biodiversité définit « la variabilité des organismes vivants de toute origine, y compris les écosystèmes terrestres, marins et autres écosystèmes aquatiques, ainsi que les complexes écologiques dont ils font partie. Elle comprend la diversité au sein des espèces et entre espèces, la diversité des écosystèmes ainsi que les interactions entre les organismes vivants »⁹. La biodiversité garantit la survie de l'ensemble des êtres vivants, y compris des sociétés humaines, en fournissant des biens et services essentiels : eau,

alimentation, médicaments, énergies et combustibles, pollinisation, fertilité des sols, régulation du climat, etc. En Europe, 72 % des sociétés non-financières dépendent directement des services écosystémiques d'après la Banque centrale européenne. A l'échelle planétaire, plus de la moitié du produit intérieur brut (PIB) dépend des services rendus par la nature et la biodiversité¹⁰.

Cependant, les activités humaines sont les principales responsables du déclin de la biodiversité, avec des écosystèmes fragilisés, transformés voire détruits à un rythme sans précédent dans l'histoire de l'humanité d'après la Plateforme intergouvernementale sur la biodi-

versité et les services écosystémiques (IPBES). Les cinq principales causes de l'érosion de la biodiversité sont la destruction et la fragmentation des milieux naturels (via le développement de l'agriculture, l'urbanisation et le développement d'infrastructures), l'exploitation directe des ressources naturelles (surexploitation, surpêche¹¹, déforestation...), le changement climatique, les pollutions et la propagation d'espèces exotiques envahissantes. En France, le constat est alarmant : on compte 80 % d'habitats naturels d'intérêt communautaire en mauvais état, 16 % d'espèces menacées ou déjà éteintes¹², et un effondrement important de populations d'insectes, d'oiseaux et d'autres animaux sauvages.

Le dérèglement climatique, induit et accéléré par les activités humaines, est une des cinq causes d'effondrement de la biodiversité (IPBES, 2019) et son rôle sera probablement amené à s'accroître en raison de son emballement et de l'intensification de ses conséquences. En outre, la dégradation des milieux naturels ne fait que renforcer ce dérèglement climatique, puisque de nombreux écosystèmes jouent le rôle de puits de carbone (océans, forêts, zones humides...). En effet, les écosystèmes terrestres (notamment les sols) et marins absorbent aujourd'hui environ 50 % des émissions de CO₂, mais ce chiffre baisse en raison de l'augmentation de la température des océans et de la dégradation de l'état de conservation des espaces naturels. Ainsi les crises de la biodiversité et du climat sont-elles intimement liées, chacune entraînant des répercussions sur l'autre : lutter contre le changement climatique au détriment de la biodiversité serait donc contre-productif.

9. Code de l'environnement, art. L.110-1.

10. World Economic Forum, 2020. *The Future of Nature and Business*, New Nature Economic Report II.

11. Pour les écosystèmes marins, l'exploitation directe des organismes vivants est le facteur qui a eu l'incidence relative la plus importante, suivi par le changement d'utilisation des terres et des mers (IPBES, 2019).

12. SDES, Bilan environnemental 2024.



© Poul Bonfils

LES ÉOLIENNES REPRÉSENTENT UN FACTEUR DE RISQUE SUPPLÉMENTAIRE POUR LA BIODIVERSITÉ

.....

La production d'énergie éolienne engendre des impacts sur la biodiversité. Ces incidences dépendent de la localisation et de la nature des sites d'implantation, de l'importance qu'ils présentent pour des espèces parfois en mauvais état de conservation, des projets ainsi que des modalités de conception, de réalisation des chantiers et d'exploitation des parcs. En effet, les éoliennes peuvent générer différents impacts i) dans la colonne d'air et au sol (emprise des machines et des activités connexes), qui modifient les conditions de vie de la faune et de la flore sauvages et sont susceptibles d'engendrer une destruction, dégradation ou altération des habitats, ii) une perte d'habitat de certaines espèces par aversion, iii) un « effet barrière » (obstacle au déplacement de la faune volante), iv) des mortalités directes principalement sur les oiseaux et les chiroptères, ainsi que v) des perturbations sur la faune dues aux modifications de champ électrique liées à la présence des câbles de raccordement.

EFFETS DE L'ÉOLIEN TERRESTRE

IMPACTS EN PHASE DE TRAVAUX

En France, les premières éoliennes ont été installées à la fin des années 1990, majoritairement dans le sud de la France, sur des espaces naturels tels que des garrigues et maquis. Avec l'augmentation de la taille des pales, permettant d'exploiter des vents moins forts, les années 2000 ont vu l'implantation de parcs éoliens dans une plus large variété de milieux, en particulier dans les plaines agricoles qui accueillent aujourd'hui environ 80 % des éoliennes installées. Par ailleurs, l'augmentation de la hauteur des machines permet techniquement de les installer aussi en zone forestière et de capter le vent au-dessus de la canopée.

L'emprise au sol d'une éolienne est réduite, entre 15 et 30 m², mais elle nécessite un terrassement de 300 à 700 m² pour couler des fondations en béton et parfois un défrichement, ainsi que des zones de stockage de la terre excavée à proximité de chaque fondation. La construction d'une éolienne implique aussi l'impact d'une plateforme de 1 000 à 1 500 m²

sur laquelle travailleront les engins de chantier et la grue de montage. Des surfaces supplémentaires seront occupées durant toute la phase d'exploitation par le poste de livraison, l'espace de stationnement prévu pour la maintenance et les voies d'accès créées ou élargies pour permettre l'accès au parc dès le début des travaux. Enfin, les éoliennes sont reliées entre elles et au poste de livraison par un réseau câblé enterré, qui peut être intégré aux voies d'accès ou relier les machines au plus court, à travers les parcelles, créant une nouvelle emprise linéaire en phase travaux. La traduction en impacts de ces pressions sur les habitats dépend grandement du contexte écologique local et des caractéristiques techniques du projet.

IMPACTS EN PHASE D'EXPLOITATION

Outre leur impact sur les habitats en phase de construction et de démantèlement, les incidences directes des parcs éoliens terrestres sont majoritairement documentées et connues en phase d'exploitation sur la faune volante, en particulier les oiseaux et les chauves-souris. D'autres taxons peuvent être concernés, comme certaines populations de mammifères terrestres.

IMPACTS SUR L'AVIFAUNE

La collision des oiseaux avec les pales est l'impact le plus souvent évoqué au sujet de l'énergie éolienne. Cependant, les parcs peuvent également engendrer un dérangement et une modification des comportements de certaines espèces. En effet, au-delà des potentielles altérations ou destructions d'habitats en phase travaux, l'implantation d'éoliennes peut altérer l'abondance ou la distribution de certaines espèces, avec, dans de nombreux cas, une perte d'habitat constatée¹³. Par ailleurs, les parcs peuvent créer un « effet barrière » pour de nombreux oiseaux en déplacement migratoire, saisonnier ou encore journalier, les exposant à un risque de collision ou les obligeant à contourner les secteurs concernés et induisant ainsi une augmentation de la dépense énergétique associée à leur vol.

.....
13. Par exemple Riols et Loyrette (2015), Ilty et Duriez (2018) ou encore Marques *et al.* (2017).



Busard pâle © Alexandre Bertheau

En arrière des parcs éoliens, qui modifient l'écoulement des flux d'air, un effet de sillage peut aussi perturber le vol des oiseaux. Il s'agit donc ici d'une perte, ou, a minima, d'une dégradation des conditions d'accès à des habitats fonctionnels de reproduction ou de chasse pour des espèces parfois protégées. Pour les oiseaux ne détectant pas les éoliennes ou le risque lié à la rotation des pales, une mortalité directe peut être due à des collisions ou possiblement à un barotraumatisme chez les petits

passereaux (lésions internes potentiellement fatales engendrées par les brusques variations de pression atmosphérique dues au déplacement des pales d'éoliennes). Les espèces les plus souvent retrouvées au pied des éoliennes sont par exemple le Roitelet à triple bandeau, le Martinet noir, le Faucon crécerelle, la Mouette rieuse, l'Alouette des champs ou encore la Buse variable¹⁴. Les rapaces diurnes, tous intégralement protégés en France, sont particulièrement à risque en raison de leurs comportements de vol et du mauvais état de conservation de certaines de leurs populations ; ils doivent faire l'objet d'une attention particulière dans les études et les mesures d'atténuation d'impacts des projets.

La mortalité aviaire dépend de nombreux facteurs, notamment le type d'habitat et son utilisation par l'avifaune (nidification, alimentation, repos, voie de déplacement, etc.), la proximité de points chauds de biodiversité (aires protégées, haies, forêts, zones humides, etc.) et les caractéristiques techniques des machines installées – en particulier la surface balayée par le rotor, la hauteur du bas des pales et la vitesse de rotation.

LE PROJET VULNEO,

coordonné par l'Institut méditerranéen de biodiversité et d'écologie marine et continentale et finalisé en janvier 2025, consiste en une évaluation de la sensibilité et de la vulnérabilité de l'avifaune aux éoliennes terrestres en France métropolitaine, dans un contexte de sélection de futurs sites d'implantation de centrales éoliennes terrestres de moindre impact environnemental. Pour ce faire, 142 espèces d'oiseaux ont été étudiées en combinant des indices relatifs à leur risque d'extinction (démographie, statut de conservation, importance des populations françaises à l'échelle européenne) et un risque de collision basé sur leur comportement de vol (notamment le temps passé à hauteur de la zone balayée par le rotor des éoliennes, estimé à partir de données de télémétrie GPS ou de critères morphologiques). La vulnérabilité des oiseaux est calculée en croisant leur sensibilité à l'éolien terrestre avec la densité de turbines par maille du territoire. Il ressort de l'analyse que les espèces les plus sensibles à l'éolien sont les grands rapaces, en premier lieu les grands vautours (dont les éoliennes sont pour certains parmi les principales causes de mortalité¹⁵), l'Aigle royal, la Grue cendrée ou encore le Milan royal.

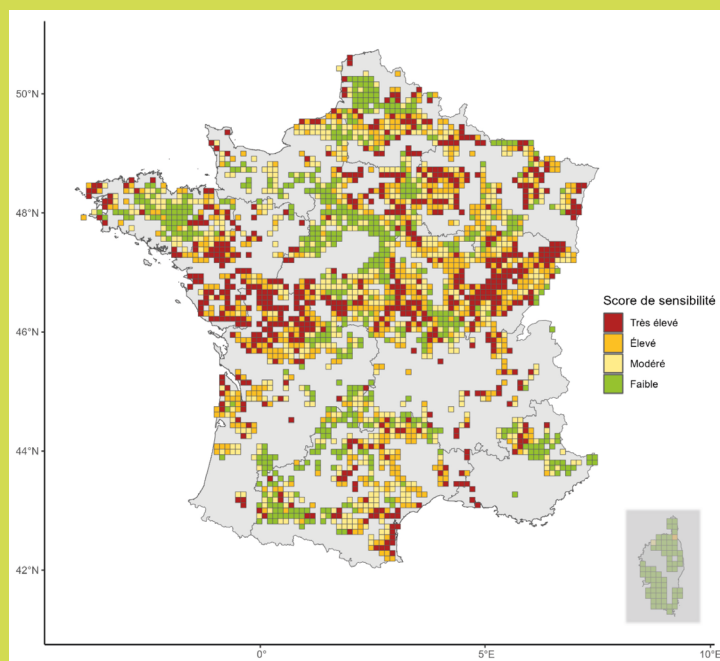
14. Marx, 2017.

15. Plan national d'action en faveur du Vautour fauve.



Parmi les autres espèces fortement sensibles, ressortent principalement des oiseaux de grande taille et à hauteur de vol élevée comme les grands goélands, les cigognes, les cygnes et les oies.

En croisant la sensibilité des espèces, leur aire de répartition et la distribution géographique des parcs éoliens français, les chercheurs ont défini un score de vulnérabilité relative, qui place en première place les espèces de plaine agricole et milieux ouverts, qui sont fortement confrontés aux parcs éoliens (Œdicnème criard, Outarde canepetière, petits faucons, goélands, Vanneau huppé, Busards cendré et Saint-Martin, Buse variable, etc.). Cet indicateur permet d'établir une hiérarchie plus représentative des espèces en fonction de leur risque réel de mortalité éolienne.



Distribution spatiale du score de sensibilité globale à l'éolien des communautés aviaires présentes dans les mailles avec potentiel de production d'énergie éolienne (les zones grises correspondent à des secteurs sans potentiel éolien). Les valeurs proposées pour la Corse ne sont pas représentatives en raison d'un échantillonnage insuffisant de l'avifaune.

Source : rapport du projet VULNEO.

La cartographie des scores de sensibilité de l'ensemble des espèces étudiées permet d'identifier les secteurs à plus fort enjeu, on remarque en effet que la répartition des niveaux de sensibilité sur le territoire métropolitain n'est pas homogène. Bien sûr, ces cartes ne remplacent pas les études locales et au cas par cas sur les projets. Les chercheurs du projet VULNEO ont ensuite calculé le potentiel de production d'énergie éolienne dans l'ensemble des mailles du territoire pour le comparer avec les objectifs de la PPE, ce qui permet d'estimer que ces derniers pourraient être atteints en implantant des parcs éoliens uniquement au sein des mailles où sont présentes des communautés aviaires au score de sensibilité globale faible. Cette évaluation, bien que seulement indicative, souligne le potentiel d'évitement du risque de mortalité pour l'avifaune avec une planification éclairée par des données scientifiques.

IMPACTS SUR LES CHAUVES-SOURIS

Comme l'avifaune, les chiroptères subissent des impacts directs des éoliennes par collision et barotraumatisme¹⁶, et indirects par la modification des conditions d'habitats. Néanmoins, ces espèces sont toutes strictement protégées sur le territoire métropolitain, nombre d'entre elles présentent des dynamiques de population préoccupantes et elles font l'objet de plans nationaux d'action depuis 1999.

La modification des habitats engendrée par les projets éoliens peut avoir des impacts très différents sur les espèces de chiroptères selon les milieux modifiés. En effet, la perte d'une parcelle de culture céréalière aura un impact négligeable par rapport à celle d'une forêt de feuillus ou mixte, un bocage ou une zone humide. En forêt, l'implantation d'un parc éolien engendre des impacts très variables sur ces animaux : le défrichage peut entraîner la destruction d'arbres-gîtes tandis que l'ouverture de clairières et de pistes forestières crée des zones potentiellement favorables pour le déplacement des chiroptères et leur activité de chasse, ce qui les expose cependant à un risque accru de mortalité si des turbines sont disposées à proximité. Les recommandations européennes (traité Eurobats) et les travaux de recherche¹⁷ indiquent ainsi qu'une implantation des éoliennes à distance des habitats favorables est primordiale pour limiter les impacts. Enfin, on notera que les parcs éoliens ont tendance à générer des effets sur le comportement des chauves-souris, induisant à la fois une attraction vers les machines et une aversion vis-à-vis du parc, qui semblent liées pour partie aux effets de sillage¹⁸. Ces perturbations comportementales commencent à être caractérisées scientifiquement et dépendent de l'espèce, de la période de l'année ou encore des conditions météorologiques¹⁹.

La mortalité de chiroptères est globalement plus fréquente que la mortalité aviaire²⁰, mais toutes les espèces n'ont pas la même sensibilité. En Amérique du Nord et en Europe centrale, les taux de collision moyens sont estimés entre 12 et 14 chauves-souris tuées par éolienne et par an^{21,22}.



Oreillard gris © Aurélien Audevard

En Europe, si les populations d'espèces à faible risque de collision semblent être stables ou en progression²³, après un effondrement au cours du XX^e siècle du fait de la modification des pratiques agricoles et de l'emploi massif de pesticides de synthèse, un déclin est toujours observé pour des espèces à haut risque de collision. Par exemple, la Noctule commune présente un effondrement de 53 % de sa population entre 2006 et 2023 en France²⁴, tendance qui s'observe également en Europe centrale²⁵, malgré son statut de protection nationale et internationale. En effet, le mode d'alimentation est un facteur de risque, puisque les espèces qui chassent en plein ciel (comme les noctules ou les vespères) sont plus vulnérables que celles qui s'alimentent à basse altitude²⁶. Par ailleurs, les espèces migratrices (comme les noctules et certaines pipistrelles) sont également très exposées au risque de collision - un pic de mortalité est d'ailleurs enregistré entre août et septembre, période correspondant à la migration automnale. En outre, il semblerait que les chiroptères utilisent peu l'écholocation pour se diriger en migration, mais plutôt la vue, habitués à voler à une altitude où ils ne rencontrent pas d'obstacle. Ainsi, ils seraient capables de détecter les mâts des éoliennes²⁷, mais ils semblent mal percevoir les pales en mouvement.

16. Les poumons des chiroptères sont particulièrement grands et souples, avec une membrane alvéolaire très fine et fragile, résistant mal à des variations brutales de pression atmosphérique.

17. Barré *et al.*, 2023.

18. Leroux *et al.*, 2024.

19. Roemer *et al.*, 2017.

20. Marx, 2017.

21. American Wind and Wildlife Institute, 2020.

22. Voigt *et al.*, 2022.

23. Van der Meij *et al.*, 2015.

24. Vigie-Chiro, Muséum national d'histoire naturelle, 2024.

25. Printz *et al.*, 2021.

26. Roemer *et al.*, 2017.

27. Aucune mortalité de chauve-souris n'a encore été notée sur une éolienne à l'arrêt, d'après Gaultier, Marx et Roux, 2019.

Ces risques de mortalité peuvent être accentués par un phénomène d'attraction parfois observé autour des éoliennes. En effet, certaines espèces, notamment arboricoles comme la Pipistrelle de Nathusius (la deuxième espèce la plus fréquemment retrouvée au pied des éoliennes en France et en Europe), ont tendance à être attirées par les machines. Les éoliennes constituent de grandes structures dans le paysage, autour desquelles ces animaux sociaux ont tendance à se regrouper, adoptant les mêmes comportements que sur de grands arbres, pour se reposer ou se reproduire (ce phénomène, appelé *swarming*, survient durant la migration automnale), ainsi que pour se nourrir d'insectes – possiblement attirés par le balisage lumineux et la chaleur dégagée par les turbines²⁸. L'ouverture de milieux forestiers liée à la construction de certains parcs éoliens joue également un rôle dans ce phénomène d'attraction sur les individus en déplacement.

EFFETS DE L'ÉOLIEN EN MER

Concernant l'éolien en mer – ou *offshore* – certains impacts sont similaires à l'éolien terrestre en matière de risque pour la faune volante, bien qu'ils soient nettement moins bien documentés et concernent aussi des taxons résidant dans le milieu marin. En revanche, de nombreuses spécificités de l'éolien en mer justifient d'en détailler ci-après les risques possibles pour les différents compartiments concernés²⁹.

IMPACTS EN PHASE DE TRAVAUX

L'implantation de parcs éoliens et leur raccordement au réseau électrique nécessitent des travaux parfois lourds sur les fonds marins, tels que le battage ou le forage de pieux ou d'ancrages, ainsi que le tranchage et l'ensouillage des câbles. Ces travaux, dont l'ampleur et la nature dépendent des technologies employées, engendrent des destructions d'habitats, une remise en suspension de matériaux, un remaniement des fonds, ainsi que des bruits et vibrations. L'atterrissage des câbles de raccordement induit des impacts potentiellement significatifs sur les plages et les espaces dunaires. Par ailleurs, la circulation des navires de chantier provoque une augmentation de la fréquentation du site, qui mène à une hausse

du bruit, du risque de collision des mammifères marins, un dérangement des oiseaux posés sur l'eau et en alimentation (alcidés, puffins, canards marins...) et d'éventuelles pollutions. Les effets du démantèlement sur les écosystèmes marins sont similaires aux effets de la phase travaux, bien qu'il existe peu de littérature sur le sujet, du fait du faible retour d'expérience à l'heure actuelle.

EFFETS EN PHASE D'EXPLOITATION

IMPACTS SUR LA FAUNE VOLANTE

Durant l'exploitation du parc, des effets similaires à l'éolien terrestre sont attendus, avec un risque de collision avec la faune volante. En effet, les milieux marins sont utilisés par de nombreux migrateurs qui se déplacent à des altitudes et des horaires variables, selon les espèces, la période de l'année et les conditions météorologiques. Ces animaux migrateurs – oiseaux et chauves-souris – peuvent non seulement longer les zones côtières mais aussi traverser des mers et des océans, ce qui les rend également vulnérables à des parcs positionnés à de grandes distances des côtes. Des chauves-souris ont même été repérées en mer, à plus de quinze kilomètres du littoral, effectuant un déplacement journalier hors période de migration³⁰. Par ailleurs, de nombreux oiseaux marins peuvent être victimes de collision, notamment dans des conditions météorologiques dégradées. Ces oiseaux peuvent également subir une perte d'habitats³¹, notamment dans le cas des oiseaux plongeurs pélagiques. Enfin, on notera que les fondations ou les flotteurs peuvent être utilisés par certains oiseaux comme des reposoirs ou des sites d'alimentation (en raison de « l'effet récif » engendrant localement une hausse de la biomasse), augmentant le risque de collision avec les éoliennes.



28. Programme OPRECh, 2022.
29. UICN, 2014 et UICN, 2023.

30. Chabrolle comm. pers.
31. Rapport du projet BirdMove, 2025.

IMPACTS SUR LA FAUNE SOUS-MARINE

Durant le fonctionnement des parcs éoliens en mer, les vibrations dues à la rotation des turbines émettent des niveaux sonores nettement plus faibles qu'en phase de construction, inférieurs à ceux du transport maritime et du bruit ambiant en milieu marin, donc sans incidence notable sur les organismes vivants³². Néanmoins, les opérations de maintenance des équipements nécessitent un déplacement de navires, qui peut engendrer un risque de dérangement de la faune, voire de collision avec les mammifères marins. On notera que certains parcs proposent aussi des activités de tourisme industriel, avec, dans certains cas, de nombreuses rotations journalières de bateaux offrant des visites au public, entraînant un dérangement supplémentaire de la faune marine.

Le fonctionnement du parc suppose aussi d'autres impacts potentiels. D'une part, on peut noter des effets possibles liés aux câbles sous-marins avec la création de champs électromagnétiques, auxquels sont sensibles notamment les raies, requins et poissons amphihalins (migrant entre milieu marin et milieu d'eau douce) dont les comportements et déplacements peuvent être affectés à proximité des liaisons électriques³³. Une augmentation de la tem-

pérature peut également être notée autour du câble, dont les conséquences sur le benthos (ensemble des organismes vivant sur les substrats des fonds marins) semblent toutefois assez marginales³⁴. Un phénomène de *biofouling* survient souvent sur les structures immergées, notamment pour l'éolien flottant (flotteurs, câbles), entraînant un dépôt de matière organique sur le fond à l'origine d'une modification potentielle du milieu. Deux types de protections sont employées pour limiter la corrosion des structures métalliques immergées. Les anodes sacrificielles, largement employées en milieu marin, typiquement sur les coques de bateaux, diffusent dans l'eau des ions métalliques tandis que les protections par courant imposé (ICCP) génèrent des dérivés chlorés, des éléments toxiques pour les organismes marins³⁵. Enfin, la rotation des turbines génère un effet de sillage jusqu'à plus de 70 km en aval des parcs, qui peut entraîner une réduction de la vitesse du vent à hauteur de 40 %³⁶ et une remontée de masses d'eau (dit « upwelling ») qui peut s'effectuer entre le parc et la côte. Ce phénomène d'*upwelling*, faisant remonter de l'eau chargée en nutriments du sédiment, engendre généralement des proliférations de phytoplancton (parfois toxique)³⁷ qui peuvent influencer en cascade la distribution de l'ensemble des maillons trophiques des chaînes alimentaires associées³⁸.



Dauphin bleu et blanc © Paul Bonfils

32. Comité français de l'UICN, 2014.

33. Dernouny, 2022.

34. Ifremer, 2019.

35. Rapport du projet PolluEcume, 2024.

36. Liu *et al.*, 2023.

37. Grosdemange comm. pers.

38. CNRS, 2021.

DES SOLUTIONS EXISTENT POUR LIMITER L'IMPACT DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE SUR LES ÉCOSYSTÈMES

LA RÉGLEMENTATION FRANÇAISE ENCADRE LE DÉVELOPPEMENT DES ÉNERGIES RENOUVELABLES AU REGARD DES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX

A L'ÉCHELLE NATIONALE

En 1992, la Convention-cadre des Nations Unies sur le changement climatique (CNUCC) était adoptée au Sommet de la Terre, à Rio de Janeiro, reconnaissant l'existence et l'impact du dérèglement climatique, aux côtés de la Convention sur la diversité biologique, un des documents clés sur le développement durable. L'accord de Kunming-Montréal a été ratifié lors de la 15^{ème} conférence des parties (COP) à la Convention sur la diversité biologique de Montréal en 2022. Il engage les Etats signataires, dont la France, à stopper et inverser la tendance d'érosion de la biodiversité à l'horizon 2030. En parallèle, l'Union Européenne offre un cadre pour la protection des écosystèmes avec des outils tels que les Directives « Habitats » et « Oiseaux », créant le réseau Natura 2000, le Règlement sur la restauration de la nature ou encore la Directive cadre stratégie pour le milieu marin (DCSMM). En matière de transition énergétique, la *Renewable Energy Directive* (RED) fixe des objectifs de production d'énergies renouvelables et introduit des mécanismes de simplification des procédures administratives, telles que la définition de zones d'accélération de la production d'énergies renouvelables (ZAEr).

Afin d'honorer ses engagements internationaux et européens, le gouvernement français a élaboré sa Stratégie nationale biodiversité (SNB) à l'horizon 2030, dont les mesures s'inscrivent dans les cibles du cadre mondial de Kunming-Montréal. Parmi les axes principaux s'inscrit l'accompagnement des secteurs prioritaires dans la réduction de leurs impacts environnementaux, et notamment le renforcement

de la prise en compte des enjeux de protection de la biodiversité dans les projets d'infrastructures énergétiques³⁹. Cette mesure se décline en plusieurs actions : l'impossibilité de situer des ZAEr dans certaines aires protégées (parcs nationaux, réserves naturelles, zones Natura 2000 terrestres pour les chauves-souris, zones de protection forte en mer), le financement de projets de recherche et de développement pour l'amélioration des techniques de réduction des impacts, ainsi que la valorisation des connaissances sur le lien entre énergies renouvelables et biodiversité grâce à un observatoire dédié à l'éolien en mer et un observatoire des énergies renouvelables terrestres.

Pour répondre à l'objectif de déploiement des énergies renouvelables en France, plusieurs initiatives de planification territoriale ont vu le jour comme la cartographie des zones favorables au développement de l'éolien terrestre, demandée aux préfets de région en 2021, ou encore la loi relative à l'accélération de la production des énergies renouvelables, dite loi APER, promulguée le 10 mars 2023. Celle-ci s'articule autour de quatre axes : planifier avec les élus locaux le déploiement des énergies renouvelables dans les territoires, simplifier les procédures d'autorisation des projets, mobiliser les espaces déjà artificialisés et partager la valeur des projets avec les territoires qui les accueillent. Cette loi s'empare des questions de biodiversité en intégrant plusieurs dispositions. Tout d'abord, elle acte la création de l'Observatoire des énergies renouvelables et de la biodiversité, visant à réaliser un état des lieux de la connaissance et des incidences des énergies renouvelables sur la biodiversité.

39. Stratégie nationale biodiversité 2030, Axe 1.2, Mesure 15.

Ensuite, elle complète la SNB 2030 en rappelant que les zones prioritaires pour le développement de l'éolien en mer doivent prendre en compte les objectifs de préservation de la biodiversité, en particulier dans les aires marines protégées⁴⁰. Enfin, dans le cadre du partage territorial de la valeur, elle indique que les candidats retenus à l'issue de procédures de mise en concurrence ou d'appels à projets pour l'éolien en mer sont tenus de financer des projets de protection ou de sauvegarde de la biodiversité. C'est dans ce cadre que sont créés les Fonds biodiversité liés aux appels d'offre pour l'éolien en mer et gérés par les Agences de l'eau.

A L'ÉCHELLE DES PROJETS

Les projets d'énergies renouvelables, comme d'autres activités industrielles et d'aménagement, sont encadrés par des dispositions réglementaires garantissant leur moindre impact sur la biodiversité. En particulier, les éoliennes sont soumises à la réglementation des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE)⁴¹. Ainsi, les éoliennes dont la hauteur de mât est supérieure à 50 m et les parcs dont la puissance totale installée est supérieure à 20 MW et dont la hauteur de mât d'au

moins une éolienne est supérieure à 12 m sont soumis à autorisation environnementale. Le dossier de demande d'autorisation doit comprendre une étude d'impact, réalisée sous la responsabilité du porteur de projet, qui rend compte, entre autres, des effets potentiels ou avérés du projet éolien sur l'environnement et permet d'analyser et justifier les choix retenus au regard des enjeux identifiés. Cette étude d'impact a pour objectif de protéger l'environnement en établissant un état initial le plus exhaustif possible, en s'appuyant sur des études robustes et en proposant des mesures d'adaptation du projet selon un principe itératif, permettant d'atténuer ses impacts afin de répondre notamment

au principe de « zéro perte nette de biodiversité ». L'étude d'impact aide donc à la conception du projet par la prise en compte des enjeux et sensibilités, elle permet aussi d'informer le public des raisons du projet, des démarches entreprises et des effets attendus. Enfin, elle a également pour but d'éclairer les pouvoirs publics sur la décision à prendre au regard des enjeux environnementaux du territoire concerné.

Le contenu de cette étude d'impact est proportionné à la sensibilité environnementale de la zone concernée et à la nature des travaux prévus. Elle s'attache à analyser les enjeux environnementaux à différentes échelles : sur la zone d'implantation potentielle, dans l'aire d'étude immédiate (incluant une zone tampon de plusieurs centaines de mètres), dans l'aire d'étude rapprochée (correspondant à la zone principale des possibles atteintes fonctionnelles aux populations d'espèce de faune volante) et dans l'aire d'étude éloignée (qui englobe tous les impacts potentiels et comprend l'aire d'analyse des impacts cumulés du projet avec d'autres projets éoliens, d'aménagement ou d'infrastructures). L'étude d'impact contient une analyse de l'état initial de l'environnement, pour identifier et hiérarchiser l'ensemble des enjeux des milieux susceptibles d'être affectés par le projet, en vue de fixer le cahier des charges environnemental que le projet devra respecter. Ensuite, l'évaluation des incidences du projet sur l'environnement constitue le cœur de l'étude d'impact. Les impacts « bruts » du projet sont évalués en l'absence des mesures d'évitement et de réduction, puis les impacts « résiduels » seront estimés en tenant compte de ces mesures. Celles-ci sont des engagements du maître d'ouvrage, elles doivent être réalisables, précisément décrites, chiffrées et faire l'objet de mesures de suivi. Si en dépit des mesures de réduction d'impact, la destruction d'un ou plusieurs habitats d'espèces animales ou végétales protégées ne peut être évitée, la création d'un habitat de substitution peut alors être envisagée. Celui-ci doit permettre de répondre aux principes d'une mesure compensatoire à l'écart de la zone à risque et doit faire l'objet d'un suivi scientifique scrupuleux. Les mesures compensatoires doivent être suffisamment dimensionnées, mises en œuvre pendant toute la durée des impacts au plus près du site endommagé, sur les mêmes types d'écosystèmes et d'espèces que ceux impactés par le projet. Elles prennent généralement la forme



40. Pour rappel, les aires marines protégées sont incompatibles avec le déploiement d'activités industrielles dont l'implantation d'énergies renouvelables et de leur raccordement, d'après le Comité français de l'UICN et l'UICN Monde.

41. Loi n°2010-788 (Grenelle II).

de restauration de sites naturels dégradés, de création de nouveaux habitats et de gestion écologique des milieux.

Cette démarche d'intégration des enjeux environnementaux est centrale dans la planification, la conception et la réalisation des projets. La définition de l'ensemble des mesures environnementales s'articule comme une séquence logique, visant en priorité à éviter les atteintes à la biodiversité puis, à défaut, à réduire celles qui n'ont pu être évitées

et enfin à compenser si l'évitement et la réduction ne s'avèrent pas suffisants. Cette séquence est désignée par l'appellation « éviter-réduire-compenser » et vise une absence de perte nette voire un gain de biodiversité dans l'exécution de projets d'aménagement du territoire. Si ses impacts ne peuvent pas être évités, réduits ni compensés, un projet ne peut être autorisé en l'état⁴². Un suivi des mesures ERC est généralement réalisé après l'implantation des projets d'énergies renouvelables, il est obligatoire dans le cas des projets éoliens.

LA SÉQUENCE EVITER-RÉDUIRE-COMPENSER (ERC),

introduite en droit français en 1976, donne un cadre standardisé pour évaluer et réduire l'impact des plans et projets d'aménagement, dans le but de n'engendrer aucune perte nette de biodiversité, voire un gain. Cette méthode fournit une base méthodologique commune à tous types de projets, en intégrant à leur définition les enjeux environnementaux pour permettre aux maîtres d'ouvrage d'effectuer des choix au regard de ceux-ci. Son principe est d'établir une hiérarchie entre les mesures de protection des milieux naturels, en commençant par l'évitement des impacts négatifs du projet, en réduisant ensuite l'étendue des impacts n'ayant pas pu être évités et enfin en compensant les impacts résiduels en proposant une contrepartie écologique au moins équivalente. Ces mesures peuvent être complétées par des mesures d'accompagnement et de suivi, pour améliorer leur succès et l'évaluation de celui-ci. Les protocoles de suivi sont définis dès l'autorisation environnementale et peuvent mener à une adaptation des mesures ERC si des écarts significatifs sont constatés entre les impacts attendus et les impacts réels du projet.

Les mesures d'évitement sont les seules capables de supprimer certains impacts du projet sur la biodiversité, et doivent donc être pensées en priorité et en amont des mesures de réduction et de compensation. L'évitement consiste à comparer plusieurs scénarios d'implantation pour choisir l'option garantissant le moindre impact sur la biodiversité. Si aucun scénario ne semble pleinement satisfaisant au regard des enjeux résiduels, l'application de la démarche d'évitement peut conduire à abandonner un projet. Certaines adaptations techniques ou temporelles en phase de chantier ou d'exploitation sont parfois considérées comme de l'évitement, mais elles ne peuvent généralement pas démontrer une absence stricte d'impacts et doivent donc être appréciées comme de la réduction. En effet, celle-ci vise à diminuer la durée, l'intensité et l'étendue des impacts négatifs n'ayant pu être évités.

42. D'après l'article L. 163-1 du Code de l'environnement.



Enfin, les mesures de compensation sont mises en place pour apporter une contrepartie au moins équivalente écologiquement aux impacts résiduels, c'est-à-dire n'ayant pu être évités ni réduits. L'objectif de la compensation est d'assurer l'absence de perte nette de chacun des éléments de biodiversité impactés, voire un gain net de biodiversité. Ces mesures de dernier recours font l'objet d'une obligation de résultat, doivent être pérennes, effectives au moment des impacts et donc anticipées, et s'implanter à proximité du projet pour garantir leur bénéfice sur le site ou l'espèce endommagée.

DÈS LA PLANIFICATION ET LA CONCEPTION DES PROJETS ÉOLIENS, UNE BONNE PRISE EN COMPTE DE LA BIODIVERSITÉ DOIT PERMETTRE D'ÉVITER EFFICACEMENT UNE PARTIE DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

.....

Une cartographie croisée des enjeux dès la planification des projets est fondamentale pour éviter l'implantation des infrastructures éoliennes dans des zones sensibles pour la biodiversité. Les projets ne peuvent en effet pas être prévus sur la seule base d'une opportunité foncière ou du gisement de vent. La planification de l'éolien doit intégrer la réglementation et les contraintes techniques, telles que la ressource en vent, la topographie, la nature des sols ou des fonds marins, les considérations environnementales et sociales, les effets cumulés, l'accessibilité et le raccordement au réseau. L'identification des mesures environnementales visant à prévenir et minimiser les effets négatifs sur la biodiversité et les services écosystémiques est une considération primordiale tout au long de la phase de planification et de conception des projets.

Une bonne connaissance des enjeux écologiques dès l'amont de la phase de planification est essentielle pour évaluer les risques d'impacts et identifier les mesures appropriées. Les plus efficaces sont en général intégrées dès la phase de planification et de conception, lorsque les changements d'emplacement des infrastructures et de planification opérationnelle sont encore possibles. Ce processus itératif doit être

répété jusqu'à ce que les impacts résiduels soient maîtrisables en limitant le besoin de mesures compensatoires, souvent inexistantes, coûteuses et parfois difficiles à mettre en œuvre, en particulier en milieu marin ou dans des contextes de tension foncière.

Les zones à éviter lors de la planification des projets comprennent les aires protégées et les zones de protection forte, les habitats d'espèces menacées ou vulnérables, les zones de forte densité de faune volante (par exemple, en mer, le long des bathymétries favorables), les secteurs concentrant les déplacements de la faune tels que les principaux couloirs migratoires et sites d'escale, certains reliefs, les « goulets d'étranglement » (vallées, détroits, lidos, pointes et caps) et certains éléments linéaires (cours d'eau ou lisières forestières, en particulier pour les chauves-souris). Des zones d'évitement appropriées autour de ces secteurs sensibles devraient être mises en place, afin de minimiser le risque de perturbations et de collisions avec les éoliennes pour les espèces vulnérables. A cet égard, les chercheurs recommandent des zones « tampon » entre les habitats favorables et les sites d'implantation d'énergies renouvelables, que ce soit pour les chauves-souris⁴³, les oiseaux⁴⁴ ou encore certains mammifères⁴⁵.

.....

43. Recommandations Eurobats.

44. Par exemple, une distance d'évitement de 2 km est recommandée autour des sites utilisés par l'Outarde canepetière par De Pracontal et al., 2020, cohérente avec les recommandations de Bretagnolle et al., 2025.

45. Par exemple, la réglementation portugaise exclut les infrastructures éoliennes et de raccordement d'un périmètre de 2 km autour des zones de reproduction connues du Loup gris, d'après une étude de Ferrão da Costa et al., 2018.

LA RÉDUCTION DES IMPACTS DANS LES PROJETS ÉOLIENS

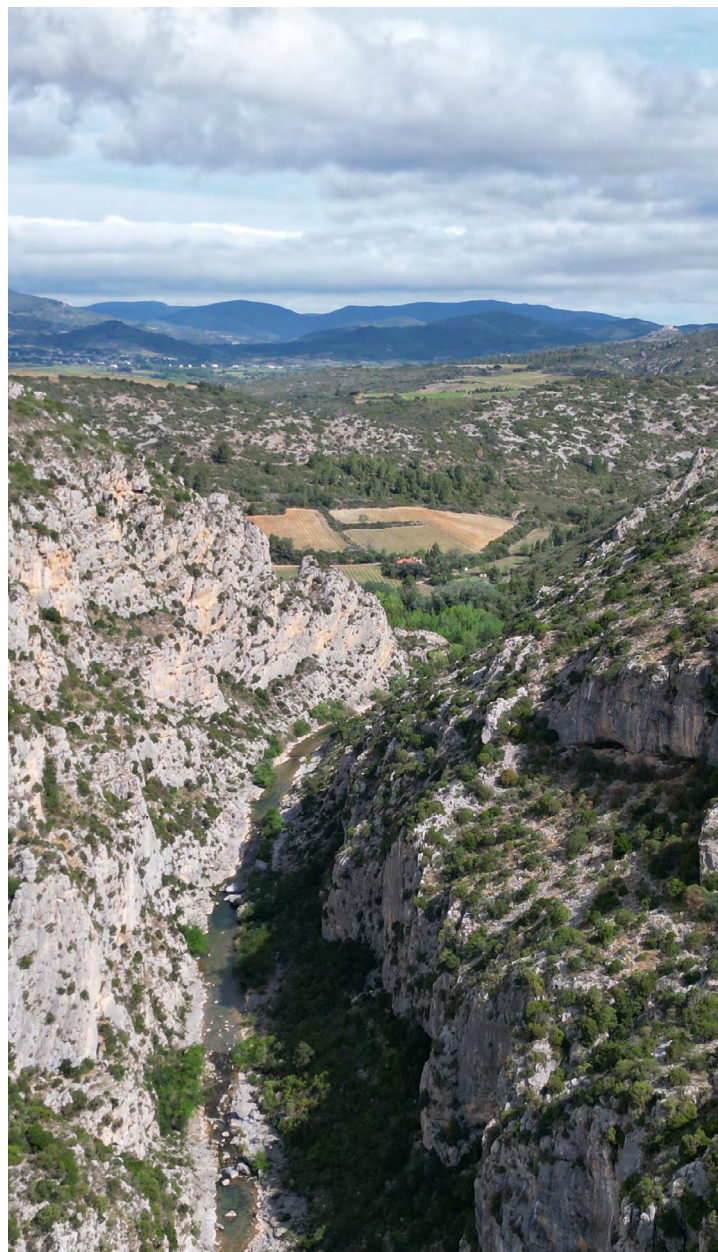
.....

Lors de la planification et de la conception d'un projet éolien, si les mesures d'évitement ne permettent pas de supprimer l'ensemble des impacts environnementaux pouvant être générés, la réduction intervient dans un deuxième temps. Celle-ci vise à obtenir des impacts résiduels les plus faibles possibles, n'engendrant pas de perte notable de biodiversité ni de services écosystémiques. Les mesures de réduction sont mises en place au niveau du projet, ou à sa proximité immédiate. Elles concernent les phases de chantier (construction et démantèlement), qui peuvent s'avérer préjudiciables pour les milieux et le maintien de leurs fonctionnalités biologiques, ainsi que les phases d'exploitation du parc éolien et de ses infrastructures.

Les mesures de réduction peuvent être classées en trois types différents : on parle de réduction géographique, technique et temporelle, chacune pouvant s'appliquer aux phases de construction, d'exploitation ou de démantèlement. La réduction géographique consiste à limiter l'étendue des impacts liés au projet. La réduction technique vise à limiter l'intensité des impacts liés au projet. Enfin, la réduction temporelle consiste en l'adaptation des périodes et horaires des travaux de construction et de démantèlement, ainsi que des périodes et horaires d'exploitation, d'activité et d'entretien durant le fonctionnement du parc éolien.

Les mesures de réduction et d'évitement, parfois assez semblables dans leur application, font régulièrement l'objet de confusions dans les dossiers d'études d'impacts. La principale différence réside dans leur effet : si une mesure d'évitement permet la suppression totale des impacts du projet sur l'environnement, une mesure de réduction ne peut garantir un risque nul et son efficacité dépend de plusieurs facteurs tels que le matériel utilisé ou les conditions météorologiques. Typiquement, une des premières façons d'atténuer les impacts est l'optimisation de l'emplacement des éoliennes, que l'on appelle couramment le « *micro-siting* ». Celui-ci consiste à positionner les infrastructures (éoliennes, pistes d'accès, tracé de raccordement, postes techniques) en dehors des zones les plus sensibles pour la biodiversité, et à adapter la disposition du parc pour minimiser les obstacles aux déplacements des

espèces. Ce *micro-siting* peut donc être considéré comme une mesure d'évitement si l'on considère certains habitats spécifiques dont la destruction sera prévenue, mais ne reste qu'une mesure de réduction si l'on s'intéresse au risque de collisions. Une mesure de réduction est d'ailleurs toujours associée à un impact défini - par exemple, une disposition réfléchie des turbines des éoliennes pourra diminuer leur impact sans pour autant l'éviter totalement.



© Paul Bonfils

Le référentiel national d'aide à la définition des mesures ERC classe les mesures de réduction de la manière suivante, elles sont ici précisées dans le contexte des projets éoliens :

TYPE DE MESURE	PHASE DU PROJET	MESURE DE RÉDUCTION
RÉDUCTION GÉOGRAPHIQUE	CONCEPTION	Optimisation de la disposition des turbines et des emprises annexes (<i>micro-siting</i>).
	TRAVAUX	- Mise en défens de secteurs sensibles sur le site du projet (flore, habitats). - Adaptation des voies de circulation pour limiter le dérangement de la faune et la destruction d'habitats.
	EXPLOITATION	Adaptation des voies de circulation (maintenance, visites...) pour limiter le dérangement de la faune.
RÉDUCTION TECHNIQUE	CONCEPTION	- Dimensions et caractéristiques de fonctionnement des machines (hauteur, garde au sol ou tirant d'air, vitesse de rotation...). - Amélioration de la visibilité des éoliennes pour les oiseaux (peinture des pales, du mât...). - Adaptation des engins de chantier. - Optimisation de la gestion des matériaux sur le site (déblais/remblais). - Diminution de l'attractivité du site pour la faune avant les travaux.
	TRAVAUX	- Prélèvement et relocalisation des espèces à enjeu particulier avant leur destruction par le chantier. - Lutte contre la propagation des espèces exotiques envahissantes. - Lutte contre les pollutions, gestion des eaux pluviales et de chantier. - Limitation des nuisances (bruit, éclairage nocturne...).
	EXPLOITATION	- Gestion des habitats selon les enjeux du site de projet. - Limitation des facteurs d'interférence avec la faune (bruit, éclairage...). - Dispositifs anticollisions (bridage réactif, ou dynamique) : bridage* des turbines ou effaroucheurs sonores.
RÉDUCTION TEMPORELLE	TRAVAUX	- Adaptation de la période du chantier sur l'année (éviter des périodes de plus forte sensibilité écologique) ou en cas d'enjeux spécifiques arrêt des travaux en mer en présence de cétacés). - Adaptation des horaires de travaux (selon les enjeux écologiques).
	EXPLOITATION	Adaptation des périodes et horaires de fonctionnement : bridage statique ou prédictif.



Le bridage consiste à volontairement mettre à l'arrêt une turbine (en modifiant l'angle des pales, on parle d'hélice « en drapeau »), en général pour éviter un danger de collision avec la faune volante. Dans un premier cas, ce bridage peut être planifié et les éoliennes s'arrêtent lors d'une période prédéfinie ou dans des conditions météorologiques correspondant à un pic de risques calculé par modèles statistiques ; on parle de bridage passif, statique ou encore prédictif. Dans un second cas, l'arrêt de l'éolienne intervient en réaction directe à l'arrivée d'une menace (un ou plusieurs oiseaux ou chauves-souris volant vers ou à proximité des turbines, détectés par radar, caméra ou microphone) ; on parle de bridage dynamique ou réactif.

Parmi ces mesures, nombre d'entre elles sont systématiquement déployées sur les projets éoliens en France, en particulier la plupart des mesures géographiques, techniques et temporelles s'appliquant durant la phase de chantier. Cependant, d'autres mesures font l'objet d'efforts particuliers de recherche et de développement, puisqu'elles visent à diminuer des impacts parfois considérables, ou encore difficilement évalués. Nous pouvons citer en particulier la réduction du bruit sous-marin sur les chantiers d'éolien offshore, le travail sur la percep-

tion des éoliennes par la faune volante, le bridage prédictif basé sur des modèles statistiques, ainsi que le bridage dynamique avec un déploiement massif de solutions technologiques variées. Parmi ces diverses méthodes de réduction des impacts de l'éolien sur la biodiversité, il est parfois difficile de s'y retrouver. Fonctionnent-elles vraiment ? Leur déploiement est-il justifié par des performances à la hauteur des enjeux ? Peuvent-elles vraiment être considérées comme des mesures de réduction efficaces ?



Le chapitre suivant propose des retours d'expériences à la fois des experts scientifiques et des développeurs sur des pressions particulières comme le bruit, la mortalité des chiroptères, la mortalité des oiseaux, etc.

Il a été en effet nécessaire de répondre à ces interrogations en collectant les retours d'expérience de divers projets éoliens, sur terre et en mer, et en interrogeant le monde de la recherche et ses nombreuses publications.

Les témoignages concrets de la filière permettent de mieux comprendre la démarche des développeurs et le résultat de leurs expérimentations.

La littérature apporte un éclairage scientifique sur ces retours d'expérience, livrant certaines réponses et révélant les zones d'ombre de la connaissance.



Pluviers dorés © Alexandre Bertheau

ÉCLAIRAGES & RETOURS D'EXPÉRIENCES



LA RÉDUCTION DES RISQUES DE MORTALITÉ DES CHIROPTÈRES PAR LES MESURES DE BRIDAGE DES ÉOLIENNES TERRESTRES

L'enjeu lié aux chiroptères est important sur les parcs éoliens français. En effet, le territoire métropolitain accueille 34 espèces de chauves-souris, toutes intégralement protégées et faisant l'objet d'un plan national d'actions⁴⁶.

Leur stratégie de reproduction lente, produisant un seul jeune par an, combinée à une longévité élevée (jusqu'à une trentaine d'années) rendent les populations de chauves-souris très vulnérables à toute augmentation de la mortalité⁴⁷. La liste rouge nationale des chiroptères indique en 2017 que huit espèces sont menacées (vulnérables, en danger, ou en danger critique d'extinction) et huit quasi-menacées⁴⁸, contre respectivement quatre et sept en 2009. La situation des chauves-souris est donc de plus en plus préoccupante, en raison de diverses pressions d'origine humaine à l'origine de l'effondrement des populations d'insectes dont elles se nourrissent, de la destruction de leurs habitats (zones de chasse, gîtes, reposoirs...) et de mortalités directes.

Les parcs éoliens représentent une réelle menace pour les chauves-souris ; en effet ils peuvent être à l'origine de collisions ou de barotraumatismes, de dégradation ou de modification des habitats, et de perturbations comportementales⁴⁹. En plus de se trouver sur les voies de déplacement ou à proximité des zones de chasse des chauves-souris, les éoliennes peuvent avoir sur celles-ci un effet d'attraction, aggravant ainsi le risque de mortalité. Plusieurs hypothèses ont été émises pour expliquer ce phénomène⁵⁰ :

- Une confusion des éoliennes avec de très grands arbres, et leur utilisation comme reposoirs en journée ou comme repères pour certains rassemblements nuptiaux ;
- La présence de nombreux insectes (eux-mêmes attirés par la hauteur des structures, la chaleur dégagée et la lumière des nacelles), rapprochant les animaux en chasse des pales en rotation (des études basées sur de l'imagerie thermique ont permis de montrer que la concentration d'insectes permettait de prédire l'activité des chiroptères et donc la mortalité) ;
- A terre, la construction des pistes d'accès et des parcs éoliens crée des éléments paysagers (clairières, lisières...) favorables au déplacement et à la chasse des chauves-souris ;
- Une réponse au balisage lumineux des éoliennes, certaines espèces semblant attirées par la lumière (notamment la Pipistrelle pygmée par les éclairages nocturnes de couleur rouge⁵¹) ;
- Une possible émission de sons par les pales dans des fréquences comparables à celles de gros insectes ; des chauves-souris ont déjà été observées « pourchassant » les pales dans le nord-est de la France⁵².

46. PNA Chiroptères 2016-2025.

47. Barclay & Harder, 2003.

48. Comité français de l'UICN, 2017.

49. Portail technique de l'OFB (« Ecoconcevoir les projets de parcs éoliens terrestres »).

50. Guest *et al.*, 2022.

51. Voigt *et al.*, 2018.

52. S. Bellenoue comm. pers. in Dulac, 2008.

Les facteurs d'attraction des chauves-souris par les parcs éoliens sont donc multiples, ils dépendent fortement de l'espèce considérée, des habitats présents autour des éoliennes et des conditions météorologiques, et restent encore difficiles à élucider.

Dans le nord-ouest de l'Europe, où de fortes concentrations d'éoliennes terrestres sont implantées dans des pays placés sur des voies de migration stratégiques pour de nombreuses espèces européennes de chiroptères⁵³, les suivis de mortalité indiquent que les parcs éoliens tuent plusieurs centaines de milliers de chauves-souris par an (principalement des noctules, pipistrelles, vespères et sérotines), avec des chiffres très variables selon leur emplacement. En effet, les taux de mortalité semblent fortement corrélés à des critères paysagers comme la topographie et la végétation. Les plus fortes mortalités sont par exemple enregistrées sur des collines boisées au sud de l'Allemagne ou sur le littoral atlantique français, avec une moyenne de 18 à 20 chauves-souris tuées par éolienne et par an. En revanche, dans des paysages d'agriculture intensive de plaine, comme dans le nord-ouest de l'Allemagne, les taux de mortalité sont bien plus faibles, avec en moyenne 0,4 cadaure par éolienne et par an. Dans les paysages agricoles plus variés, le taux de mortalité est plus élevé, en particulier sur les reliefs et à proximité des zones boisées⁵⁴.



Minioptere de Schreibers © Aurélien Audevard

Cette compréhension de l'impact des parcs éoliens, combinée aux modèles de dynamique des populations, permet d'anticiper un risque d'extinction de plusieurs espèces. En Amérique du Nord, le développement de l'énergie éolienne engendre le déclin d'une espèce migratrice, la Chauve-souris cendrée (*Lasiurus cinereus*), et pourrait être responsable de son extinction d'ici à 2050⁵⁵. La mise en place de mesures de réduction peut atténuer ce risque ; une vitesse de vent minimale de démarrage de l'éolienne (*cut-in speed*) fixée à 5 m/s permet dans certains cas de réduire de 62%

en moyenne les mortalités de chiroptères⁵⁶. Les taux d'efficacité mesurés varient néanmoins fortement autour de cette moyenne et n'atteignent jamais une mortalité nulle, même pour des seuils de démarrage fixés à de grandes vitesses de vent. Cette technique a donc une efficacité variable et jamais totale, elle ne permet en aucun cas de remplacer une démarche d'évitement.

Le cadre réglementaire français soumet les projets éoliens à l'obligation de réaliser une étude d'impact. Si, après l'évitement des zones les plus sensibles, des impacts résiduels sur les chiroptères sont anticipés, les projets éoliens doivent prévoir des mesures de réduction ; les prescriptions techniques nationales préconisent une régulation des turbines en fonction de la période de l'année, de la vitesse du vent et de la température, ou guidée par l'installation d'un système de détection des chauves-souris. Les suivis post-implantation, caractérisant l'activité des chauves-souris à hauteur de nacelle et la mortalité sous les éoliennes, doivent être conduits durant au moins 20 semaines consécutives comprises au minimum entre mi-mai et fin-octobre avec au moins, à terre, un passage par semaine au pied de chaque éolienne, ou plus selon les enjeux du projet, le temps de persistance de cadaures ou les données de mortalité.

53. Hulterer *et al.*, 2005.

54. Rydell *et al.*, 2010.

55. Friedenberg & Frick, 2021.

56. Whitby *et al.*, 2021.

En France, seulement 44 % des parcs éoliens terrestres ont mis en place une ou plusieurs mesures de régulation en faveur des chiroptères, avec un déploiement qui semble variable d'une région à l'autre⁵⁷. Une étude acoustique passive à hauteur de nacelle permet de déterminer, pour chaque site de projet, les risques de collision⁵⁸ et donc de dimensionner des mesures de réduction adaptées aux espèces en présence. Pour limiter les mortalités, une première approche consiste à mettre à l'arrêt les éoliennes selon différentes modalités, qui peuvent être classées en quatre familles :

- Mode de régulation « sous seuil de production » : lorsque la vitesse de vent est inférieure au seuil technique de production, les pales sont mises en drapeau pour éviter de tourner « dans le vide » (ce qui peut être cause de mortalité pour les chauves-souris, qui volent à des vitesses de vent faibles voire très faibles).
- Mode de régulation « préventif » ou « conventionnel » : en l'absence de connaissance fine des enjeux et des conditions de vol des chauves-souris à hauteur de rotor sur le site, cette mesure envisagée par défaut est dimensionnée de façon empirique, sur la base d'un pattern de régulation qui a fait ses preuves sur des parcs éoliens alentours ou à une échelle plus large. Typiquement, on effectue souvent un bridage lorsque le vent est inférieur à 6 m/s et la température de l'air supérieure à 10°C⁵⁹. Elle est en principe accompagnée de la mesure précédente, c'est-à-dire que les pales sont mises en drapeau sous le seuil de démarrage.
- Mode de régulation « prédictif » ou « multicritères » : cette approche se veut adaptée aux conditions de risque locales, puisque de nombreux autres facteurs que la vitesse du vent et la température influencent le risque de mortalité⁶⁰. Dans ce cas, le bridage est dimensionné sur la base d'une perception fine des enjeux identifiés sur le site et des conditions pour lesquelles le risque de vol des chauves-souris à hauteur de rotor est le plus élevé, modélisées par des algorithmes⁶¹. Ce mode suppose de disposer d'un suivi de l'activité des chauves-souris en continu sur au moins une année de référence. Selon les paramètres les plus influents pour caractériser le risque sur le site étudié, un pattern de bridage multicritères (vitesse et direction du vent, température, horaires, période de l'année, précipitations, pression atmosphérique, etc.) est défini au cas par cas à l'aide des outils de modélisation.
- Mode de régulation « dynamique » : cette technique consiste à stopper les turbines en réaction à la détection en temps réel d'une activité de chauves-souris.

Une autre approche consiste à émettre des ultrasons pour effaroucher les chauves-souris, mais cette méthode semble peu efficace, adaptée à une partie seulement des espèces, et ne peut être employée qu'en complément d'une mesure de bridage.

Ces mesures de régulation sont de plus en plus souvent intégrées dans les projets éoliens en développement, en lien avec une meilleure compréhension des risques, ainsi que l'évolution des protocoles réglementaires et des prescriptions nationales. Aujourd'hui, 72 % des études d'impact des nouveaux projets comportent une proposition de mesure de bridage en faveur des chiroptères, toutefois des disparités régionales persistent et une proportion toujours importante de parcs construits et de projets en cours n'ont pas prévu de mesure de régulation, ce qui n'est pas acceptable au vu des connaissances scientifiques sur l'impact des parcs éoliens sur la faune volante⁶².

57. Programme OPRECh, 2022.

58. Roemer *et al.*, 2017.

59. Barré *et al.*, 2023.

60. Thompson *et al.*, 2017.

61. Barré *et al.*, 2023.

62. Programme OPRECh, 2022.

Une motion appelant à une meilleure prise en compte des enjeux liés aux chauves-souris, proposée par plusieurs organisations internationales de protection de l'environnement dont Bat Conservation International, a de ce fait été votée au Congrès mondial de la nature de 2025 (<https://iucncongress2025.org/assembly/motions/motion/044>).

RETOURS D'EXPÉRIENCE



Intégration paysagère d'un parc éolien en Vendée © wpd

PARC ÉOLIEN EXPLOITÉ EN VENDÉE

En Vendée, la société wpd développe un projet constitué de quatre éoliennes de 3 à 5 MW chacune, implantées sur une superficie de 1,77 ha à cheval sur deux communes. Autorisé en novembre 2024 et prévu pour une mise en service entre 2027 et 2028, ce projet inscrit dans les zones d'accélération de la communauté de communes Sud Vendée Littoral est situé en dehors de tout zonage écologique – le plus proche étant une ZNIEFF I à plus de 500 mètres de la première éolienne. La zone d'étude du projet est majoritairement exploitée en grande culture, mais comprend aussi des zones humides, un bois et des haies bocagères. Les inventaires naturalistes ont révélé des enjeux avifaune et chiroptères liés aux boisements et aux haies, et notamment des arbres sénescents de fort intérêt écologique (gîtes pour les chauves-souris, développement de coléoptères saproxylophages...). La première mesure a été d'éviter au maximum l'implantation des éoliennes et des pistes d'accès dans les milieux présentant un intérêt écologique notable, les prairies et boisements naturels, les zones humides et les haies. L'ensemble des aménagements et les chemins de raccordement ont été pensés afin de préserver la totalité des arbres d'intérêt ; de même les ouvertures de haies préexistantes sont exploitées pour le passage des câbles souterrains. L'accès aux éoliennes a été pensé pour réduire les impacts sur les haies fonctionnelles, avec une attention particulière à l'évitement strict de tout arbre d'intérêt écologique. Afin d'optimiser l'implantation des éoliennes, une expertise chiroptérologique spécifique a été mise en œuvre pour identifier l'activité des chauves-souris en fonction de la distance aux haies les plus proches, et la garde au sol minimale du rotor a été fixée à 40 mètres, conformément à la doctrine régionale des Pays de la Loire. En raison des contraintes foncières du projet, les éoliennes sont installées à une distance des haies comprise entre 90 et 250 mètres – contrairement aux préconisations Eurobats d'une distance minimale de 200 mètres⁶³. Pour réduire la mortalité des chiroptères, un plan de bridage « conventionnel » est mis en place tout au long de l'exploitation du parc.

63. Rodrigues et al., 2015.

Les quatre éoliennes sont arrêtées toute la nuit, du 1^{er} avril au 31 octobre, dès lors que les conditions suivantes sont réunies :

- Entre le 1^{er} avril et le 30 juin : température supérieure à 10°C et vitesse du vent inférieure à 7,6 m/s à 110 mètres de hauteur.
- Entre le 1^{er} juillet et le 31 août : température supérieure à 11°C et vitesse du vent inférieure à 7,6 m/s.
- Entre le 1^{er} septembre et le 31 octobre : température supérieure à 10°C et vitesse du vent inférieure à 8,9 m/s.

Ces paramètres correspondent aux conditions semblant les plus favorables à l'activité des chauves-souris, identifiées grâce aux données acoustiques recueillies par le mât de mesure durant les études de l'état initial du projet. La proportion maximale d'activité couverte par ce modèle, correspondant donc à la mortalité théoriquement évitée, est comprise entre 77 % (au printemps)

et 95 % (en automne). En pratique, l'efficacité de ce bridage pourra être déterminée au cours des suivis de mortalité post-implantation. Ceux-ci, conformément au protocole ministériel en vigueur, seront réalisés en 24 passages entre mi-mai et fin octobre à minima sur les trois premières années d'exploitation. Ce suivi de mortalité sera associé à un suivi d'activité des chiroptères à hauteur de nacelle, réalisé en continu sur le cycle biologique complet durant trois années consécutives et corrélé avec les données météorologiques correspondantes (vitesse de vent, température, précipitations).



Enregistreur de chauves-souris © wpd

Cette mesure de régulation, qui correspond au bridage classiquement mis en place sur l'ensemble des projets développés par l'entreprise wpd, engendrera des pertes de production électrique estimées à 7 % au regard des projections météorologiques actuelles.

PARC ÉOLIEN EXPLOITÉ DANS LA MARNE

La commune d'implantation du parc, dans la Marne, se situe dans un territoire densément équipé d'éoliennes. En janvier 2017, un premier parc de cinq turbines est mis en service, agrandi par douze éoliennes supplémentaires en mai 2022 installées par deux sociétés déjà implantées dans la région, Engie Green (qui exploite les cinq premières machines) et Romande Energie. Le secteur est très largement anthropisé, exploité en grandes cultures et donc de faible intérêt écologique. Il compte de petits boisements résiduels et quelques haies, qui concentrent les enjeux en matière d'avi-faune et de chiroptères. Lors des inventaires pour le projet d'extension, entre 2016 et 2017, dix espèces de chauves-souris ont été répertoriées, utilisant ces habitats comme zones de chasse et corridors de déplacement. Le projet a donc été adapté en maintenant une distance minimale de 200 mètres entre les éoliennes et les haies et lisières, et avec la mise en place de mesures de réduction lors du chantier et tout au long de l'exploitation du site. Pour réduire la mortalité des chauves-souris, l'exploitant a mis en place un bridage « conventionnel » dès 2022 sur toutes les éoliennes du parc selon les paramètres suivants : les nuits du 15 juin au 15 septembre de chaque année, quand la température est supérieure à 10°C, les éoliennes ne se mettent en mouvement que lorsque la vitesse de vent dépasse le seuil de 6 m/s.

Un protocole de suivi de l'activité acoustique des chiroptères au sol, à hauteur de nacelle, et de la mortalité est mis en place. Le suivi de la mortalité est conduit une fois par semaine durant six mois, soit 24 passages par an effectués le matin pour limiter les risques de prédation des cadavres tombés pendant la nuit. La mortalité brute des chiroptères est très faible sur les premières années post-implantation, avec un cadavre trouvé la première année et aucun la seconde. Néanmoins, ces chiffres dépendent fortement de la persistance des cadavres, paramètre indispensable à l'estimation de la mortalité réelle⁶⁴ et qui doit être évalué sur chaque site d'implantation. Par ailleurs, les suivis acoustiques de l'activité des chiroptères devront permettre de quantifier la proportion d'activité en nacelle couverte par le plan de bridage, afin d'évaluer sa performance.

EFFICACITÉ DES MESURES



Petit rhinolophe © Aurélien Audevard

L'efficacité du « bridage chiroptères » nécessite une bonne compréhension des facteurs d'activité et du risque de mortalité

Évoquons tout d'abord l'exemple d'un parc de six éoliennes dans le Cantal, équipé d'un système de bridage conventionnel qui a subi un dysfonctionnement pendant 24 jours en septembre 2024. Durant ce laps de temps, les suivis du site ont permis de noter une mortalité importante et inédite sur ce parc avec quatre Pipistrelles communes et une Pipistrelle de Kuhl retrouvées au pied des éoliennes⁶⁵.

Plusieurs approches existent pour arrêter les éoliennes dans le but de protéger les chauves-souris. Toutes ne bénéficient pas du même retour d'expérience et la connaissance de leur performance reste encore assez inégale⁶⁶. L'efficacité de chaque mesure ne peut être appréciée qu'après sa mise en œuvre, via un suivi post-implantation fin et suivant un protocole robuste et standardisé qui permettra le cas échéant de corriger le dimensionnement de la mesure.

■ **Le bridage « conventionnel »**, défini avec une vitesse seuil de démarrage des éoliennes et en ajustant l'orientation des pales pour éviter leur rotation libre, est l'approche la plus largement mise en œuvre sur les parcs éoliens et dont plusieurs études ont tenté d'évaluer l'efficacité. Celles-ci montrent que l'implémentation d'un seuil de démarrage peut réduire considérablement la mortalité des chauves-souris sur des parcs éoliens dans le monde entier. Cependant, davantage de recherches sont nécessaires pour confirmer l'efficacité de ces mesures de régulation dans divers contextes, affiner les configurations saisonnières et mieux comprendre leurs effets à long terme sur les populations de chiroptères.

■ **Le bridage « multicritères »** intègre des ajustements plus fins correspondant aux variations d'activité saisonnières, météorologiques et comportementales des chauves-souris. Plusieurs études ont testé, dans des contextes variés, diverses combinaisons de vitesses de seuil de démarrage, de paramètres environnementaux et phénologiques pour estimer leur impact sur la mortalité des chauves-souris

64. Ravache et al., 2024.

65. Ministère de la transition écologique, Bureau d'analyse des risques et pollutions industriels.

66. Quinard et al., 2024.

et la perte de productible énergétique. Ces projets de recherche permettent de mieux comprendre comment des ajustements spécifiques des plans de bridage peuvent influencer l'efficacité de la réduction des mortalités, offrant ainsi la possibilité d'affiner les algorithmes et les modélisations d'activité pour optimiser les mesures de bridage multicritère. Plus le nombre de critères est important, plus fine est la mesure et moins elle est susceptible de générer des pertes de production⁶⁷.

■ **Les systèmes de bridage « dynamique »**, déclenchant l'arrêt des turbines en réaction à la détection en temps réel d'une activité de chauves-souris, constituent des solutions innovantes pour réduire la mortalité des chauves-souris. Néanmoins, leur capacité à réduire efficacement les risques de mortalité est moins solidement documentée que pour les modes de régulation statique. Une étude publiée en 2022 sur un parc éolien du Wisconsin (Etats-Unis) a montré qu'un système de bridage en temps réel permettait une baisse significative des mortalités par rapport aux éoliennes non régulées⁶⁸, néanmoins il engendrait des pertes substantielles de production en comparaison des éoliennes régulées avec un bridage conventionnel. Les données de cette étude ont cependant été collectées en 2015, date depuis laquelle les technologies de détection et les algorithmes de réaction ont été améliorés. Le bridage dynamique est dépendant de la qualité de détection, du traitement des données et de la fiabilité des systèmes automatisés⁶⁹. Aujourd'hui, ce mode de régulation « réactive » est moins développé et mature que les mesures prédictives ou préventives, dites « passives ». Des recherches supplémentaires sont donc nécessaires pour standardiser les approches de régulation dynamique et évaluer leurs performances à large échelle et à long terme.

La mise en place d'une régulation du fonctionnement des éoliennes est donc essentielle pour réduire leurs impacts sur les populations de chauves-souris. La définition d'un bridage à partir de seuils fixes de vent et de température permet généralement de réduire les mortalités, mais est insuffisante pour couvrir le risque associé à la diversité d'espèces sensibles et de comportements de vol. L'utilisation d'algorithmes multicritères issus des modèles d'activité les plus fins est une approche prometteuse et plus performante, avec des outils validés dans des publications qui devraient inciter à les généraliser. Si des technologies de détection acoustique en temps réel pourraient permettre d'affiner la régulation des éoliennes et d'éviter les arrêts « inutiles » des turbines, engendrant des pertes de production parfois significatives, elles ne semblent néanmoins aujourd'hui pas capables de remplacer le bridage prédictif.

Un lien peut être établi entre certaines métriques d'activité et la mortalité des chauves-souris. Celui-ci reste partiel, en raison des biais de détection acoustique et de repérage des cadavres, ainsi que de la difficulté de modéliser le risque de mortalité associé à des comportements spécifiques (interactions sociales, parades nuptiales...) ce qui souligne l'importance d'améliorer et d'affiner les connaissances scientifiques. L'utilisation de modèles prédisant l'activité à partir de différentes variables mesurables semble être l'approche actuellement la plus efficace et la moins coûteuse^{70,71,72}. L'intégration de données acoustiques en temps réel pourrait permettre d'adapter le bridage à des événements imprévisibles et d'optimiser les modèles de régulation prédictive. Concrètement, les éoliennes pourraient être mises en fonctionnement dans certaines périodes correspondant aux paramètres de bridage prédictif si aucune activité n'est détectée autour des turbines, sous réserve d'une validation transparente des performances des systèmes de détection acoustique.

67. Behr *et al.*, 2017.
68. Rabie *et al.*, 2022.
69. Rabie *et al.*, 2022.

70. Korner-Nievergelt *et al.*, 2013.
71. Behr *et al.*, 2017.
72. Barré *et al.*, 2023.

LA RÉDUCTION DES RISQUES DE COLLISION DE L'AVIFAUNE PAR LES MESURES DE BRIDAGE PRÉDICTIF

En phase d'exploitation, les parcs éoliens représentent un risque de collision pour l'avifaune. En France, on estimait en 2017 que sur huit parcs terrestres suivis, les éoliennes tuaient entre 6,6 et 7,2 oiseaux par an, dont 81 % appartenaient à des espèces protégées et en état de conservation préoccupant⁷³. Ces chiffres seront mis à jour grâce aux estimations plus robustes issues du programme APOCOPE, mené jusqu'à fin-2026 par le cabinet Ouest Am' en partenariat avec le Muséum national d'Histoire naturelle. Pour certains oiseaux, ces collisions peuvent affecter les dynamiques de populations et accentuer la vulnérabilité face au risque d'extinction.

La première solution d'atténuation des risques d'impact consiste à éviter la construction de parcs éoliens au sein ou à proximité de zones écologiquement sensibles⁷⁴, à fort enjeu de conservation (aires protégées, routes migratoires, habitats d'espèces protégées, zones boisées ou humides, etc.)⁷⁵. Ensuite, un des axes de travail sur la réduction des incidences est de mieux comprendre les situations et facteurs engendrant un risque de collision. En effet, les oiseaux peuvent adopter des comportements de vol très variés selon l'espèce, l'âge et le sexe de l'individu, la localisation géographique, la période de l'année ou du jour, ou encore les conditions météorologiques. L'anticipation – et donc la réduction – des risques de mortalité demande donc une compréhension fine de l'écologie des espèces et de leurs interactions avec les parcs éoliens.

Les oiseaux susceptibles d'entrer en collision avec des éoliennes (pales et mât) peuvent être des nicheurs locaux, des oiseaux en transit migratoire ou en stationnement hivernal. Ceux-ci sont parfois incapables de détecter à temps les pales en rotation ou le mât, du fait de leur champ visuel et de leur position par rapport à l'éolienne, de leur acuité visuelle et leur capacité à déceler les contrastes, de mauvaises conditions de visibilité, de leur attention focalisée sur une activité particulière, ou de la combinaison simultanée de plusieurs de ces raisons⁷⁶. De très nombreuses espèces migrent de nuit ou sont capables de voler dans des conditions météorologiques très dégradées, ce qui diminue significativement leur capacité à anticiper la présence d'obstacles ponctuels tels que les éoliennes. Par ailleurs, les voies de déplacement des oiseaux suivent souvent des éléments du paysage, comme les vallées, les grands cours d'eau, les cols en montagne, et les littoraux ; ces axes correspondent bien souvent à des secteurs ventés et donc privilégiés pour l'implantation des éoliennes, ce qui accroît ainsi le risque de collision. De très nombreux oiseaux terrestres, y compris de petits passereaux, empruntent également des routes de migration au-dessus des mers (Manche, Méditerranée, océan Atlantique), et s'ajoutent donc aux oiseaux marins parmi les victimes potentielles des parcs éoliens en mer. La France est traversée par les axes migratoires d'oiseaux nicheurs de toute l'Europe, qui peuvent emprunter des couloirs continentaux, littoraux ou hauturiers pour migrer des hautes latitudes (Scandinavie, îles britanniques et le reste de l'Europe occidentale) vers leurs terres d'hivernage (sud de l'Europe et continent africain) et inversement.

73. Marx, 2017.

74. Conformément aux positionnements du Comité français de l'UICN et de l'UICN Monde.

75. « Ecoconcevoir les projets de parcs éoliens terrestres », portail technique de l'OFB.

76. Blary et al., 2023.



Vautour fauve © Paul Bonifils

L'impact des parcs éoliens sur l'avifaune a suscité la mise en place de différentes techniques pour réduire la mortalité, certaines bénéficiant d'un retour d'expérience solide quand d'autres sont encore à un stade plus expérimental. Deux approches principales ressortent : la première visant à générer une réaction d'évitement chez les oiseaux à proximité des éoliennes, appelée « effarouchement » (dont l'efficacité est aujourd'hui assez controversée), et la deuxième consistant à brider les éoliennes en arrêtant la rotation des turbines afin de réduire le risque de collision. Comme pour les chauves-souris, l'arrêt peut être déclenché dans certaines conditions définies en amont, ou en réaction directe à l'approche d'un oiseau en direction des éoliennes ; on parle aussi de bridage « statique » ou « dynamique ». Les retours d'expérience qui suivent illustrent le sujet du bridage statique dans des projets éoliens confrontés à des enjeux de préservation de l'avifaune.

DÉTERMINATION DU PLAN DE BRIDAGE ET RETOURS D'EXPÉRIENCE

L'intérêt du bridage statique, ou prédictif, est la certitude de son efficacité lorsqu'il est mis en œuvre : les éoliennes à l'arrêt représentent un risque de collision sensiblement plus faible. Tout l'enjeu de cette mesure est de définir la meilleure plage de bridage. En effet, une mise à l'arrêt des éoliennes sur une période très étendue mènera à des pertes de productible économiquement insoutenables pour l'exploitant, tandis qu'un bridage sur des fenêtres trop resserrées ne permettra pas d'assurer la survie d'une proportion satisfaisante des oiseaux de passage. Cette question demande donc d'identifier l'impact des périodes d'arrêt nécessaires à la protection de l'avifaune sur la production d'électricité. Si la rentabilité du projet n'est pas garantie, il conviendra de réviser sa localisation et sinon, de ne pas l'autoriser. Le plan de bridage doit être adapté, au cas par cas, aux enjeux du site révélés par les inventaires naturalistes et l'étude d'impact environnemental. En effet, certains projets éoliens représentent une menace principalement pour des oiseaux en transit migratoire tandis que d'autres font peser un risque plus fort sur des oiseaux nichant à proximité ou utilisant le site comme habitat fonctionnel.

PROTECTION DE L'AVIFAUNE EN CONTEXTE AGRICOLE

Dans les secteurs cultivés, la réduction des impacts des parcs éoliens peut passer par une adaptation des périodes de fonctionnement des turbines aux travaux agricoles, générant des contextes particulièrement attractifs pour les oiseaux sensibles. En effet, des rapaces tels que les milans, busards, buses et faucons fréquentent particulièrement les parcelles labourées, déchaumées, moissonnées ou ayant fait l'objet de tout autre travail mettant le sol à nu et augmentant donc l'accessibilité de leurs proies (micromammifères, insectes, lombrics...).⁷⁷ Là aussi, l'activité des rapaces dépend des différences d'assolement, de pratiques agricoles, de contextes paysagers et de cortèges d'espèces d'un parc éolien à l'autre. Le bridage agricole doit donc être adapté au contexte local, après une analyse fine des pratiques culturelles et de la fréquentation des parcelles par les oiseaux.

77. KNE, 2025.

RETOUR D'EXPÉRIENCE : BRIDAGE AGRICOLE SUR UN PARC ÉOLIEN EXPLOITÉ DANS L'YONNE

Le parc éolien mis en service dans l'Yonne en 2022 par la société Engie Green, compte six éoliennes pour une puissance totale de 18 MW. Ce projet, implanté sur 1,7 hectares de terres agricoles en grandes cultures, était initialement prévu pour 20 éoliennes. Cependant, il a été repensé pour éviter les secteurs à plus forts enjeux, présentant des milieux forestiers et bocagers abritant des espèces sensibles comme l'Aigle botté ou certaines chauves-souris, et limité à six machines. Pour réduire l'impact de celles-ci en phase d'exploitation, le porteur de projet a mis en place un plan de « bridage agricole » : les éoliennes sont arrêtées lors des moissons et déchaumages, sur les mois de juillet et août, pour répondre à l'enjeu de protection des Milans noirs et royaux fréquentant le site. Lorsque ce type de mesure est mis en place, il pourrait être pertinent de mettre en place un suivi spécifique afin de mieux évaluer son efficacité, d'autant qu'il y a encore peu de littérature scientifique à ce sujet.

PROTECTION DE L'AVIFAUNE MIGRATRICE

Dans le cas où un risque pour les populations d'oiseaux en migration est identifié, par exemple sur des parcs éoliens implantés sur des reliefs et des cols, le long du littoral ou en mer, l'identification des périodes et conditions engendrant les risques les plus élevés est la clé pour définir le plan de bridage le plus adapté.

RETOUR D'EXPÉRIENCE : BRIDAGE GRUE CENDRÉE SUR UN PARC ÉOLIEN DANS LA NIÈVRE

Lorsque le développement d'un parc de six éoliennes a été lancé dans la Nièvre, l'étude d'impact a mis en évidence sa situation au cœur du couloir migratoire de la population européenne de Grue cendrée, un très grand échassier remarquable et d'importance patrimoniale. Si cet oiseau se déplace habituellement à grande altitude, il arrive qu'il vole assez bas, dans des conditions météorologiques dégradées ou à proximité de ses haltes migratoires. Le développeur a donc cherché un moyen de limiter le risque de collisions, et pour cela un protocole spécifique a été imaginé en concertation avec la LPO Bourgogne-Franche-Comté et la DREAL. Durant le pic des migrations prénuptiale et postnuptiale, la LPO publie un bulletin quotidien de l'activité des Grues cendrées, construit sur la base des observations du Réseau Grue cendrée et des conditions météorologiques. Depuis la mise en service du parc en 2013, ce bulletin est transmis au service d'astreinte de l'exploitant, qui est capable de stopper les turbines en cas d'alerte, en attendant le nouveau feu vert de la LPO. Des suivis de mortalité ont été réalisés en 2014, 2015, 2016, 2017, 2023 et 2024, sur lesquels aucun cadavre de Grue cendrée n'a été retrouvé. Cette mesure est possible grâce à un partenariat renouvelé chaque année entre la LPO Bourgogne-Franche-Comté et l'exploitant du parc éolien, elle nécessite donc l'existence d'une association locale compétente avec les moyens techniques et humains suffisants pour réaliser de tels suivis, qui perdurent dans le temps.



Grues cendrées © Paul Bonfils

En mer, le développement de parcs éoliens permet l'accès à une ressource en vent plus stable et forte qu'à terre, avec l'implantation de turbines de plus grande taille en raison d'enjeux paysagers moindres. La question de la protection de l'aviifaune y est incontournable, puisque les flux d'oiseaux marins et terrestres migrateurs sont parfois très intenses au large. Les zones d'implantation étant prédéfinies par l'Etat et les contraintes techniques limitant l'éloignement à la côte, un bridage des parcs apparaît comme une mesure adaptée, d'autant que lors de conditions météorologiques favorables, les épisodes de migration peuvent être particulièrement concentrés⁷⁸.



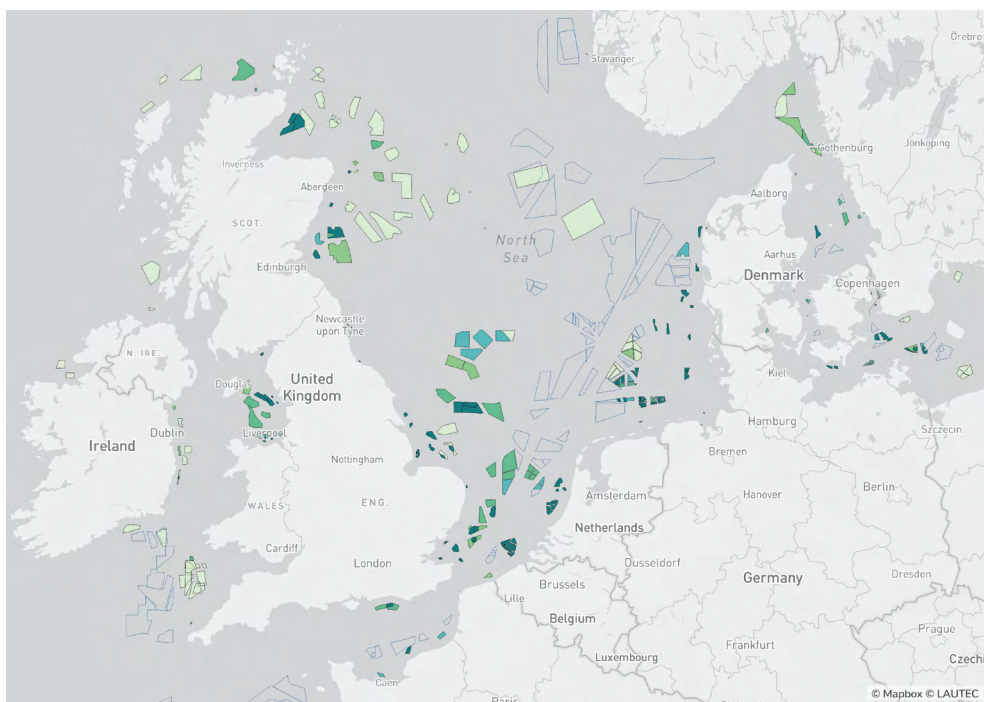
Parc éolien des îles d'Yeu et Noirmoutier © Paul Bonfils

Pour caractériser les migrations en mer des oiseaux et des chauves-souris ainsi que les fonctionnalités des zones côtières et hauturières pour les oiseaux marins tout au long de l'année, les projets MIGRALION et MIGRATLANE sont pilotés par l'Office français de la biodiversité sur l'ensemble des façades littorales françaises. Ceux-ci visent à combler le déficit de connaissances sur l'utilisation des espaces maritimes par la faune volante en Méditerranée, Atlantique, Manche et mer du Nord, pour limiter et mieux comprendre les impacts des activités humaines dont le développement des parcs éoliens. Pour cela, des campagnes de mesures et de suivis ont été lancées, exploitant une large diversité de techniques : suivis acoustiques et visuels en mer et depuis la côte, campagnes aériennes, télémétrie sur 40 espèces d'oiseaux, radars ornithologiques et météorologiques. Si le projet MIGRALION s'est terminé en 2025, MIGRATLANE se poursuit jusqu'en 2027.

78. Newton, 2010.

RETOUR D'EXPÉRIENCE : DÉVELOPPEMENT D'UN MODÈLE DE BRIDAGE EN MER DU NORD

En mer du Nord, une importante superficie est occupée par des parcs éoliens en exploitation ou à venir, notamment en amont du détroit du Pas de Calais par lequel passe une part conséquente du flux migratoire européen. L'enjeu du bridage est donc particulièrement important pour réduire un impact significatif des multiples parcs éoliens sur les populations d'oiseaux migrants.



Cartographie des projets éoliens offshore en développement et en exploitation en mer du Nord (Sea Impact, 2025)

Une équipe de recherche de l'université d'Amsterdam a établi un modèle prédictif de l'intensité de migration des oiseaux au large des côtes pour permettre au gouvernement néerlandais, selon les prévisions météorologiques, d'anticiper à 48 heures le bridage des parcs éoliens afin de limiter les collisions durant les pics de passage migratoire⁷⁹.

Ce modèle a été développé en croisant les données de suivi migratoire collectées durant cinq ans par un radar placé dans un parc éolien à 23 km des côtes néerlandaises, et divers facteurs influençant l'intensité du flux migratoire (se rapportant à la phénologie des espèces et au contexte météorologique). L'analyse des données a permis de constater que les variables les plus influentes sont les paramètres phénologiques (jour de l'année et heure de la journée) et la vitesse des vents. Au printemps, le flux migratoire dépend principalement de la phénologie, les oiseaux reproducteurs remontant au plus vite vers leurs aires de nidification. À l'automne, les conditions météorologiques jouent un plus grand rôle, les oiseaux attendant plutôt un vent favorable pour voyager vers le sud. Sur les passages migratoires de référence utilisés pour tester les calculs du modèle, au printemps 2022 et à l'automne 2020, la moitié du flux migratoire total est passée respectivement sur 18 et 26 heures.

79. Bradaric et al., 2024.

Les simulations du modèle estiment que si un arrêt des turbines avait été effectué sur les heures de plus forte intensité migratoire pour protéger 50 % des oiseaux, la perte de productible aurait équivalu à 0,12 % du total annuel. Avec des jeux de données plus conséquents, il pourrait donc être envisageable, à l'avenir, d'affiner le modèle pour prédire avec une meilleure précision les heures de plus fort passage migratoire. Cela permettrait de mettre à l'arrêt les parcs éoliens afin de protéger efficacement une part importante des oiseaux en déplacement tout en anticipant des variations de production sur le réseau et en limitant l'impact sur la rentabilité des installations.

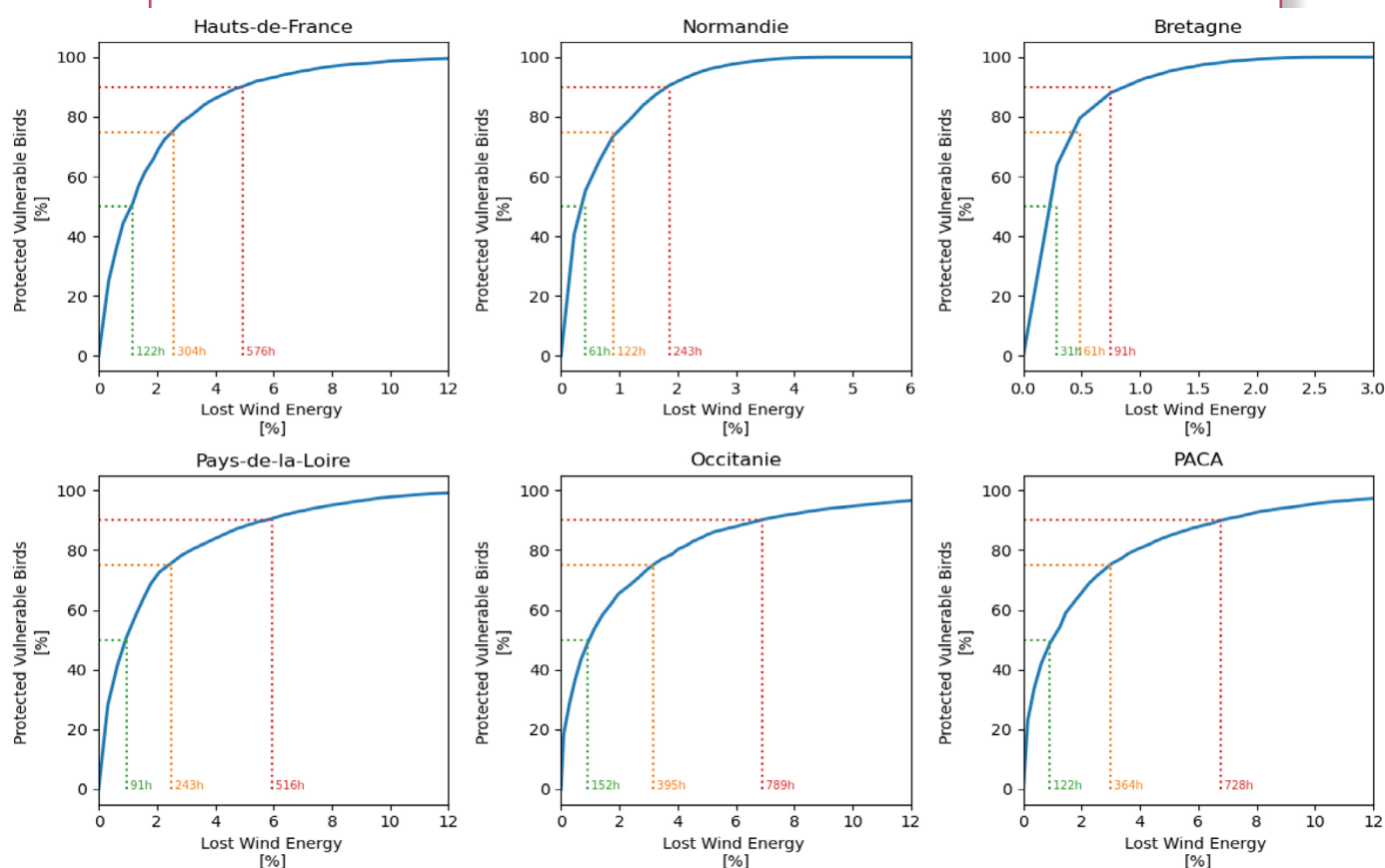
En France, aucune mesure réglementaire de bridage généralisée à l'ensemble des projets de parcs éoliens en mer n'existe à l'heure actuelle. Sur un parc flottant pilote au large du Golfe de Fos en exploitation depuis 2025, l'arrêté préfectoral d'autorisation précise les conditions d'un plan d'arrêt des machines durant les cinq premières années d'exploitation. L'exploitant est tenu d'interrompre le fonctionnement des trois éoliennes du parc sur une durée annuelle cumulée de 500 heures, répartie sur six nuits consécutives en avril et sept nuits consécutives en septembre, déterminées grâce aux données radar de migration depuis la côte. Cette mesure expérimentale fait l'objet d'une évaluation annuelle à partir des observations de caméras et d'un radar installé sur le parc, qui pourront permettre d'ajuster les modalités du protocole à l'issue des cinq années d'essai⁸⁰.

Le projet SEMAFOR, porté par France Energies Marines, vise à développer un outil de surveillance en temps réel de l'avifaune via le réseau des radars météorologiques de Météo France, et à construire un modèle prédictif des flux d'oiseaux migrants à l'échelle de la France métropolitaine. A l'instar des modèles néerlandais, les résultats de ce projet montrent que sur la France, le gros du passage migratoire s'effectue souvent sur des durées relativement courtes. Les estimations de perte de productible en lien avec les flux de migration montrent que la préservation de 50 % des migrants nocturnes correspond à réduire la production éolienne d'environ 1 % en moyenne, ou 2,5 % pour couvrir la période de migration de 75 % des oiseaux.



80. Arrêté préfectoral n°82-2017-EA de 2019.

Ces chiffres diffèrent sensiblement pour chaque région et notamment en Bretagne et en Normandie, où les flux de migrateurs nocturnes détectés par les radars météorologiques sont plus faibles que dans d'autres régions ; les passages les plus importants sont donc réduits à quelques heures par an. Dans les régions où les flux migratoires sont plus soutenus et constants au cours d'une saison, comme en Occitanie, la conservation d'une même proportion d'oiseaux serait obtenue avec un temps d'arrêt des éoliennes environ trois à cinq fois supérieur⁸¹.



Relation entre proportion d'oiseaux sauvés et proportion d'énergie éolienne perdue annuellement. Le pourcentage d'énergie perdue est proposé pour trois scénarios de protection de 50%, 75% et 90% de l'avifaune à risque (projet SEMAFOR, 2024).

La définition du plan de bridage peut donc s'appuyer sur des modèles de prédiction des flux migratoires selon les conditions météorologiques et la phénologie des espèces. L'enjeu majeur est donc aujourd'hui de collecter massivement des données de vol, pour affiner ces modèles et leur permettre de calculer avec la meilleure précision les périodes les plus stratégiques pour un bridage des parcs éoliens. La technologie radar offre des pistes intéressantes pour mieux comprendre les phénomènes migratoires à large échelle, planifier le développement de l'éolien, identifier les parcs les plus à risque et aider la filière à mettre en place des mesures de bridage adaptées. La surveillance des phénomènes migratoires pourrait également permettre d'alerter en direct les opérateurs éoliens de déplacements massifs d'oiseaux, pour déclencher une mise à l'arrêt des turbines.

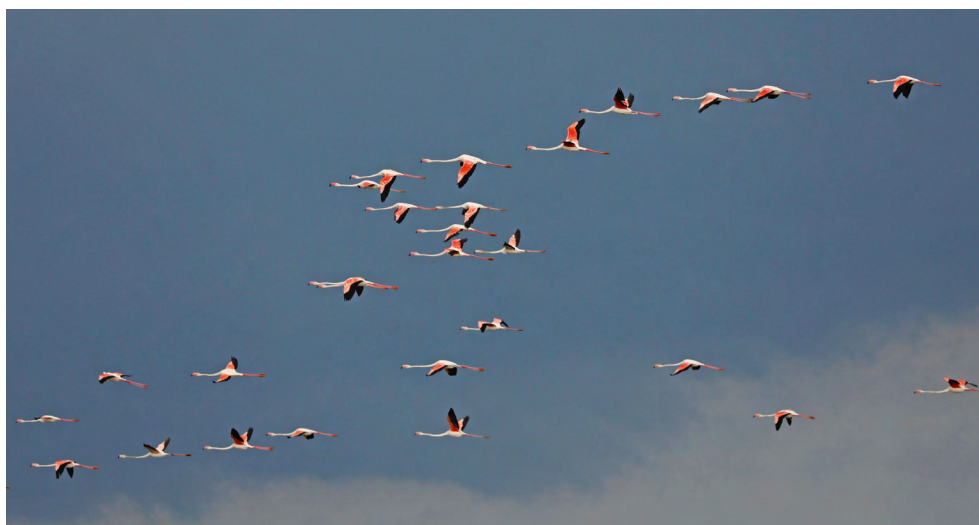
81. Roy et al., 2024.

LES SYSTÈMES DE DÉTECTION AUTOMATIQUE DE L'AVIFAUNE (SDA)

Dans un objectif d'optimisation de la régulation des éoliennes, pour ne limiter leur bridage qu'aux périodes de présence avérée d'oiseaux que l'on souhaite spécifiquement protéger, des systèmes de détection-réaction, ou systèmes de détection automatique de l'avifaune (SDA), sont déployés sur certains parcs éoliens. Ceux-ci sont utilisés pour réduire les mortalités d'espèces dites « patrimoniales », souvent de grands oiseaux (rapaces et grands échassiers).

Les systèmes de détection connus peuvent être aujourd'hui classés en quatre grandes familles : les systèmes optiques 2D (sur lesquels la détection et la classification se font par analyse de pixels), les systèmes optiques 3D (permettant une évaluation plus précise de la distance et de la trajectoire des objets repérés), les systèmes radar (de meilleure portée que l'optique, mais incapables d'identifier précisément l'espèce), et les systèmes combinant plusieurs technologies (principalement un radar à longue distance et un dispositif optique à plus courte distance).

Le fonctionnement des SDA repose sur un logiciel de reconnaissance et d'analyse d'images, s'appuyant aujourd'hui généralement sur de l'intelligence artificielle, permettant de classifier les objets repérés pour déterminer la réaction appropriée. Celle-ci dépend de la définition d'une liste d'espèces à protéger, définie en fonction des enjeux de chaque parc, de la sensibilité des espèces et de leur taille (les SDA doivent être capables de les détecter). Le choix des espèces ciblées par les systèmes de détection-réaction n'est pas motivé par des critères purement réglementaires (la plupart des espèces faisant l'objet de collisions avec les éoliennes sont protégées avec des statuts équivalents) ni scientifiques (le choix des espèces protégées ne dépend pas toujours de la vulnérabilité de leurs populations à la mortalité éolienne⁸²).



Flamants roses © Paul Bonfils

82. Chambert & Besnard, 2021.

RETOURS D'EXPÉRIENCE

RETOUR D'EXPÉRIENCE : DÉMARCHE VOLONTAIRE D'ÉVALUATION DES PERFORMANCES DES SDA DÉPLOYÉS SUR PLUSIEURS PARCS PAR UN EXPLOITANT ÉOLIEN

Valeco, producteur d'énergies renouvelables, a installé fin 2024 son centième SDA, depuis la première éolienne équipée en 2017. A l'heure actuelle, le matériel de cinq fabricants équipe 106 de ses éoliennes, représentant plus de 500 caméras permettant de détecter des oiseaux d'envergure moyenne à grande, pour déclencher un effarouchement sonore ou un arrêt de la turbine. La démarche de Valeco implique de soumettre les SDA à une série de tests pour s'assurer de leur performance, leur fiabilité et la traçabilité des données. Pour cela, l'exploitant emploie des drones, imitant des oiseaux en vol afin de vérifier leur bonne détection, l'envoi de l'ordre d'arrêt et son traitement pour l'éolienne équipée. Les systèmes sont également éprouvés en conditions réelles, grâce à un suivi par des ornithologues s'assurant que les oiseaux passant à proximité des éoliennes équipées sont correctement détectés et protégés - 114 sessions, soit plus de 770 heures de suivi, ont été menées sur 8 parcs. Enfin, des tests de ralentissement des turbines sont effectués lors des signaux envoyés par les SDA, à des forces de vent impliquant les vitesses de rotation les plus élevées de la gamme de fonctionnement des éoliennes ; selon Valeco, sur l'ensemble des machines équipées, le rotor passe de 17 à 2 tours par minute en l'espace d'environ 30 secondes. Avec ses nombreux parcs exploités, Valeco dispose d'un retour d'expérience concret. On peut citer l'exemple d'un parc dans les Pyrénées-Orientales, régulièrement fréquenté par des rapaces patrimoniaux et protégés, sur lequel quatre cadaures ont été retrouvés entre 2018 et 2020 lors des suivis de mortalité (43 prospections par an). Face à ce constat, Valeco a décidé d'équiper les dix éoliennes de SDA. Le visionnage des images et les 130 prospections de suivi de mortalité réalisées depuis leur installation n'ont pour l'instant pas permis de détecter de collision de rapace.

Cependant, les SDA ne suffisent en général pas à empêcher les mortalités. Dans le Haut-Languedoc, un parc éolien est responsable de la mort en 2023 d'un Aigle royal malgré la caméra installée sur la machine en cause et la faible vitesse de rotation résiduelle de la turbine. Dans l'Hérault encore, chacune des 31 éoliennes d'un autre parc est équipée d'un SDA, ce qui n'a pourtant pas empêché plusieurs dizaines de collisions de rapaces protégés, en particulier de Faucons crécerellettes et de Busards cendrés. Les mortalités constatées sur ces deux parcs éoliens ont par ailleurs été à l'origine de sanctions financières et pénales⁸³.

Enfin, les évaluations volontaires de la performance des SDA, si elles peuvent indiquer des efforts d'amélioration et de transparence de la part des exploitants éoliens, ne permettent cependant pas de tirer des conclusions claires sur les systèmes testés. En effet, ces évaluations reposent sur des protocoles souvent hétérogènes et mis en œuvre dans des conditions de détection optimales, avec des tailles d'échantillons parfois trop faibles pour apprécier les incertitudes statistiques.

83. Par le tribunal judiciaire de Montpellier, décision du 7 avril 2025 pour le parc d'Aumelas et du 9 avril 2025 pour le parc de Bernagues.

RETOUR D'EXPÉRIENCE : PERSPECTIVES OFFERTES PAR LES AVANCÉES TECHNOLOGIQUES POUR LA PROTECTION DE LA FAUNE VOLANTE

La progression technologique des SDA peut être illustrée avec l'exemple du système *IdentiFlight*, développé par la société *Boulder Imaging*, entreprise américaine spécialisée dans les technologies d'imagerie depuis 1995. Celle-ci lance en 2013 un programme de recherche et développement pour répondre au défi de la conservation des Aigles royaux et des Pygargues à tête blanche face au développement de l'éolien dans l'Ouest américain. La première version commerciale est lancée en 2017, elle se donne comme objectif de détecter les grands rapaces et d'effectuer un bridage dynamique sélectif minimisant les pertes de production pour les exploitants de parcs éoliens. Au fil des années, la société apporte des améliorations à la fois aux caméras et aux algorithmes d'intelligence artificielle, permettant de repérer des oiseaux de plus en plus petits et au vol de plus en plus rapide, avec un meilleur suivi et un calcul plus précis des trajectoires de vol. A partir de 2024, la cinquième version du système *IdentiFlight* est présentée comme capable d'identifier et de suivre des petits rapaces au vol rapide, puis en 2025 elle intègre un module de détection infrarouge des bandes de passereaux en migration et des chauves-souris pour être fonctionnelle de nuit. Cependant la détection des petits animaux, volant souvent rapidement et décrivant des trajectoires parfois difficilement prédictibles, reste un grand défi et n'est à l'heure actuelle pas satisfaisante pour envisager une réduction significative des mortalités. Aujourd'hui, le système *IdentiFlight* couvre environ 1100 éoliennes sur 36 parcs éoliens dans le monde, avec une performance reconnue de son algorithme de classification, mettant l'accent sur la précision de ses identifications pour limiter les faux-positifs, c'est-à-dire les déclenchements « erronés » du mécanisme de mise à l'arrêt des turbines. Si plusieurs études suggèrent une importante réduction du nombre de mortalités de grands rapaces grâce à la mise en œuvre de ce système⁸⁴, une remise en question de leur robustesse statistique⁸⁵ souligne le besoin de protocoles d'analyse rigoureux et standardisés afin de démontrer la capacité réelle de ce système, parmi les plus aboutis à l'heure actuelle, à réduire significativement les mortalités.

84. McClure *et al.*, 2018, McClure *et al.*, 2021 et McClure *et al.*, 2022.

85. Huso & Dalthorp, 2023.



Vautour fauve © Paul Bonfils

EFFICACITÉ DES MESURES

Des solutions intéressantes dont les performances doivent être évaluées à large échelle selon des protocoles scientifiques standardisés

Les technologies de détection des oiseaux en temps réel promettent une réduction du risque de collision de certaines espèces ciblées, mais à l'heure actuelle la plupart de ces systèmes ne sont pas développés de manière coordonnée et ne bénéficient pas encore d'une évaluation robuste de leur efficacité réelle. Ces dispositifs ont fait l'objet de diverses évaluations réalisées par les fournisseurs eux-mêmes, des bureaux d'études mandatés par les opérateurs éoliens, des associations ou agences gouvernementales de plusieurs pays, dont il est difficile de tirer des conclusions claires. En effet, ces études reposent sur des protocoles hétérogènes et parfois insatisfaisants, qui ne permettent pas une analyse comparative de l'efficacité de ces systèmes⁸⁶. De plus, elles sont souvent réalisées dans des conditions de détection optimale, ne couvrant pas la diversité de situations réelles⁸⁷, d'autant que les conditions les plus à risque pour les oiseaux (visibilité réduite, fort vent) sont aussi les moins propices à un fonctionnement correct des SDA. Globalement, il est peu probable qu'un système unique soit en mesure de réduire le risque de collision à un niveau soutenable pour les populations d'oiseaux parmi les plus sensibles au risque éolien, notamment du fait de la diversité des espèces impactées en termes de comportement de vol ou de morphologie⁸⁸. La compréhension de la performance des systèmes de détection-réaction nécessite de mesurer leur capacité à réduire effectivement les mortalités. Pour cela, il convient d'effectuer un suivi des mortalités avant et après leur mise en place, et d'effectuer une comparaison avec des sites témoins. Néanmoins, des biais de détection des cadavres compliquent l'évaluation du taux de mortalité réelle sur les parcs éoliens⁸⁹. En effet, de nombreux facteurs influencent le nombre de mortalités constatées lors des suivis : le périmètre de prospection autour de chaque mât (des oiseaux sont projetés loin des pales, ou ne meurent pas sur le coup), la capacité de détection des cadavres au sol⁹⁰, la fréquence et le nombre de visites du site (les cadavres sont emportés par des prédateurs). Notons qu'en mer, les cadavres d'oiseaux ne pouvant être retrouvés car tombant dans l'eau, le suivi de la mortalité représente un défi supplémentaire.

Des protocoles scientifiques standardisés doivent donc être construits pour évaluer la performance des SDA. Ceci est d'autant plus incontournable que ces systèmes sont aujourd'hui fortement plébiscités et largement déployés sur les parcs éoliens. Pour cette raison, des initiatives ont été lancées pour définir un cadre de validation des SDA, basé sur leurs performances en conditions réelles.

En Allemagne, le gouvernement a reconnu l'usage de SDA pour réduire le risque de collision des oiseaux avec les éoliennes (article 45b de la Loi fédérale sur la protection de la nature), sous réserve de répondre à des critères stricts de performance établis par le Centre de ressources allemand pour la conservation de la nature et la transition énergétique (KNE). Pour être autorisés sur des parcs éoliens, les SDA doivent assurer une couverture spatiale d'au moins 75 %, la couverture temporelle la plus complète possible, une portée de détection minimale liée à la vitesse de l'espèce considérée et au temps d'arrêt de la turbine, un taux de détection d'au moins 75 % voire 90 % dans le cas d'enjeux particuliers, et une performance de classifica-

86. Huso & Dalthorp, 2023.

87. Corbeau et Besnard, 2021.

88. VULNEO, 2025.

89. Sand, Normand, Kerbiriou et al., 2024.

90. Les chiens ont par exemple une bien meilleure performance de détection (Smallwood, 2020).



Milan royal © Paul Bonfils

tion des oiseaux par l'algorithme de 75 % au minimum, puis 90 % dans un périmètre proche des éoliennes⁹¹. Le KNE précise également des exigences en matière d'évaluation : des campagnes multi-saisons, réalisées en conditions réelles par des bureaux d'études indépendants, une comparaison avec des données de référence (observateurs, télémétrie...) et une certification par un organisme indépendant. Par exemple, le système IdentiFlight a fait l'objet d'études depuis 2021 dans différents *Länder* (divisions administratives allemandes comparables aux régions françaises) pour être homologué en Allemagne, ciblant les espèces prioritaires comme le Pygargue à queue blanche et le Milan royal. Les essais ont démontré des performances en adéquation avec les critères du KNE, avec des taux de détection et de classification entre 90 et 99 % selon les sites, permettant sa mise en œuvre sur des projets éoliens. Les *Länder*, eux aussi, peuvent définir des règles pour l'autorisation des SDA sur leur territoire ; par exemple, le *Land* de Schleswig-Holstein a mis en place un cadre en 2023, imposant aux développeurs d'éolien de joindre à la demande d'autorisation un rapport d'évaluation externe du SDA démontrant son efficacité selon les critères du KNE, ainsi que son cadre de fonctionnement et d'exploitation.

En France, un protocole d'évaluation a fait l'objet d'un développement dans le cadre du projet « MAPE », pour « mortalité aviaire dans les parcs éoliens en exploitation », porté par le CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique), le CEFE (Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive) et la MSH Sud (Maison des Sciences de l'Homme de Montpellier) entre 2020 et 2025. Celui-ci a rassemblé des chercheurs, le monde associatif, la filière éolienne et l'administration autour de plusieurs axes de travail, notamment la compréhension des causes de collisions et la construction d'un cadre d'évaluation de la performance des SDA. L'évaluation de chaque système doit tenir compte de ses capacités de détection des oiseaux, du calcul de leurs trajectoires, de la classification des espèces et de leur réactivité dans une large gamme de conditions⁹². Une méthodologie standardisée pour caractériser l'efficacité des SDA est incontournable pour aider les opérateurs éoliens à sélectionner le système le plus adapté aux besoins de leurs parcs⁹³, face à l'hétérogénéité des systèmes disponibles sur le marché. Le référentiel de validation de ceux-ci repose sur des critères de performance comme la distance minimale à laquelle les SDA doivent être capables de détecter les oiseaux pour réduire effectivement leur mortalité. Cette question a fait l'objet d'un travail spécifique, dont est issu l'outil « EolDist ». Celui-ci permet de calculer la distance de détection de précaution compte tenu de l'espèce concernée, de son comportement (vol local ou

91. Reichenbach, M. et al. (2023).
92. Ballester, C. et al. (2024).

93. Corbeau A. & Besnard A., 2021. *Les systèmes de détection-réaction dans les parcs éoliens, un moyen de réduction des mortalités aviaires. Principes et conseils pour une bonne évaluation.* Projet MAPE.

migratoire), du type d'éolienne installée, de la vitesse de vent, et de la vitesse de rotation résiduelle du rotor souhaitée lorsque l'oiseau arrive à proximité. De nombreux SDA n'étant pas suffisamment performants à l'heure actuelle, ces distances minimales de détection ont amené la filière éolienne à questionner les résultats du programme MAPE. En complément, l'Ademe et l'OFB ont donc lancé le projet « SDA+ », avec le double objectif de proposer aux fournisseurs de SDA un processus de certification volontaire de la performance atteinte par leurs systèmes en sortie d'usine, et de définir un processus opérationnel d'évaluation à large échelle de la performance des SDA installés au sein des parcs éoliens.

En définitive, les technologies de SDA peuvent être des solutions intéressantes, à condition qu'elles répondent à des exigences de performance fondées sur des critères de survie à long terme des populations tenant compte de l'ensemble des impacts cumulés, et dans la mesure où elles sont combinées à d'autres dispositifs. Une approche robuste pourrait typiquement consister à équiper un parc ou un ensemble de parcs d'une technologie radar pour une détection à large échelle, de caméras et de capteurs acoustiques pour une couverture de proximité et à déployer des capteurs d'impact sur chaque turbine. Aujourd'hui, le développement et l'évolution rapide des technologies de SDA doivent s'accompagner d'une systématisation de l'évaluation de leurs performances et de leur efficacité, pour qu'elles confirment et fassent preuve de manière transparente de leur intérêt pour la réduction des impacts.

Au-delà de leur fonction de régulation des éoliennes, les SDA peuvent représenter une alternative intéressante aux méthodes traditionnelles d'étude de l'avifaune (observation directe ou balisage satellite). En effet, ils enregistrent automatiquement de nombreuses données de présence et de comportement d'oiseaux sur des parcs éoliens dans le monde entier, dans une large variété de contextes géographiques et paysagers. Ces données peuvent être utilisées pour mieux comprendre les conditions et les causes de collision de l'avifaune, en lien avec des paramètres de fonctionnement des éoliennes ou plus largement les conditions environnementales. Par exemple, la société Biodiv-Wind, développeur d'un SDA optique 2D, mène un travail d'analyse des collisions survenues sur les 750 éoliennes équipées de son système en Europe, afin d'étudier la relation entre vitesse de rotation et mortalité des rapaces. Le CNRS, quant à lui, a étudié les causes environnementales et comportementales des collisions de l'avifaune dans le cadre du programme MAPE, en utilisant les données de plusieurs systèmes 2D et 3D sur onze parcs éoliens de la moitié est de la France, en contexte de plaine agricole. L'analyse des données récoltées par ces SDA montre que l'exposition des oiseaux à la collision avec les éoliennes dépend de la période de l'année, avec un pic durant les périodes de migration au printemps et en automne, et que leur vulnérabilité est aussi élevée en été, les oiseaux résidents utilisant fréquemment les sites éoliens comme terrains de chasse ou de nidification. Ces résultats sont cohérents avec d'autres études, reposant sur d'autres méthodes, démontrant la pertinence d'utiliser les SDA comme outils à part entière d'étude de l'avifaune sur les parcs éoliens. L'amélioration des capacités de détection de ceux-ci pourrait permettre d'étudier des espèces aujourd'hui exclues de l'analyse, comme les oiseaux nocturnes ou de petite taille, qui représentent pourtant à l'échelle du pays une part majoritaire des victimes d'éoliennes. En outre, leurs comportements de vol et leur réponse aux conditions météorologiques sont bien différents des espèces de grande taille, une meilleure connaissance de leurs risques de collision devrait donc être une priorité pour formuler des recommandations pertinentes pour une plus large gamme d'espèces.

LA RÉDUCTION DU BRUIT SOUS-MARIN EN PHASE DE CHANTIER EST INCONTOURNABLE DANS LES PROJETS ÉOLIENS EN MER

Le bruit sous-marin généré par les activités humaines a fortement augmenté dans les océans ces dernières décennies, résultant de nombreuses sources sonores telles que le trafic maritime, les relevés sismiques ou encore les forages et battages de pieux employés dans différentes industries, notamment des secteurs énergétiques. Ces phénomènes peuvent engendrer de fortes perturbations de la faune marine, pouvant aller du changement de comportement à des lésions physiologiques temporaires ou permanentes, parfois létales. Ces effets sont notamment connus chez les mammifères marins, qui émettent des sons très fréquemment pour communiquer, se déplacer et chasser, mais aussi chez les poissons, le benthos et les oiseaux plongeurs. Les dauphins et les marsouins sont des cétacés communs au large des côtes européennes mais soumis à une large variété de pressions dont le trafic maritime, la pêche industrielle, les pollutions mais aussi le bruit sous-marin. Ces espèces sensibles et à fort enjeu de conservation sont donc des récepteurs aux différentes pressions induites par les activités humaines dont les chantiers de parcs éoliens en mer. L'ensemble des cétacés sont d'ailleurs intégralement protégés par la loi en France, et font l'objet d'un plan national d'action initié en 2018.

La recherche et les retours d'expérience sur les projets d'énergies marines renouvelables mettent en évidence l'impact du bruit lié aux travaux des parcs éoliens, notamment les campagnes géophysiques préalable à la construction des parcs, les opérations de préparation des sols et les opérations d'installation des fondations, qui peuvent être à l'origine de perturbations comportementales, de lésions voire de la mort d'animaux marins^{94,95}. En outre, les éoliennes peuvent être flottantes ou posées. Les fondations des éoliennes posées diffèrent selon la profondeur, la nature des fonds et les contraintes économiques. Les fondations posées de type « monopieu » sont les plus couramment utilisées, du fait de leur simplicité de fabrication et leur faible coût. Les pieux peuvent être battus, c'est-à-dire enfoncés dans le sol à l'aide d'un marteau hydraulique – plutôt dans le cas de substrats meubles, ou forés dans le fond en présence de substrats rocheux et durs. La technique du battage induit de plus fortes émissions sonores que la technique du forage⁹⁶. Les éoliennes flottantes sont quant à elles fixées à l'aide d'ancrages dans les fonds marins. L'installation de ce type de structures génère moins de bruit que le forage ou le battage de fondations posées.

Plusieurs approches peuvent être mises en œuvre pour réduire les émissions sonores liées aux travaux de construction des parcs éoliens en mer, jouant soit sur le niveau sonore à la source, soit sur la propagation du bruit dans l'eau. L'adaptation du type de fondations et de leur technique de pose peut représenter un moyen de limiter les émissions sonores, néanmoins ce choix est généralement dicté par les caractéristiques techniques du projet et la nature du fond⁹⁷. Par ailleurs, pour limiter la propagation du son dans l'eau, plusieurs techniques consistent à envelopper la source sonore de barrières physiques absorbant et dispersant une partie des ondes sonores : un rideau de bulles, un filet rempli de ballons d'air ou un bloc isolant. Ces méthodes font l'objet de recherche et d'innovation pour mieux connaître et améliorer leur efficacité.

94. Bailey *et al.*, 2014
95. UICN France, 2014.

96. OFB, 2023.
97. Biotope, 2025.

RETOURS D'EXPÉRIENCE

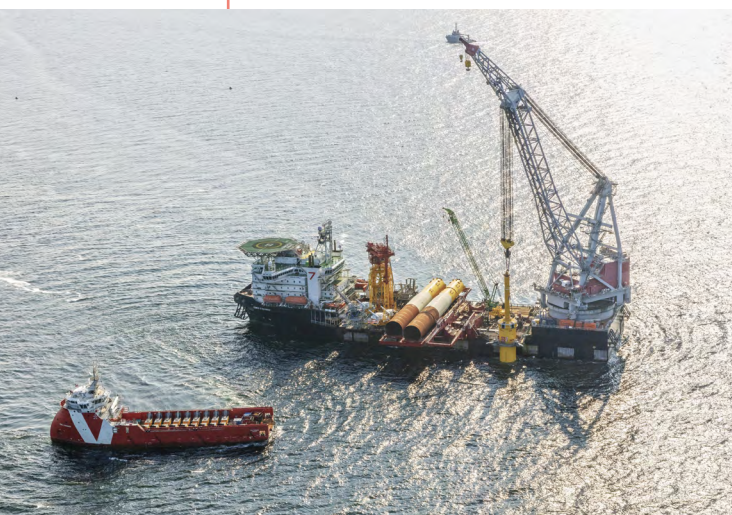
Plusieurs Etats ont défini réglementairement des seuils de bruit maximaux pour les constructeurs d'éolien en mer, comme 190 décibels (dB) à 750 mètres de la source du bruit en Allemagne ou 185 dB à 750 mètres de la source du bruit en Belgique. Dans d'autres pays où il n'existe encore aucun seuil réglementaire d'émissions sonores, comme en France, des mesures peuvent toutefois être mises en place pour réduire l'impact des travaux sur la biodiversité marine.

RETOUR D'EXPÉRIENCE : CONCEPTION D'UN PROJET INCLUANT DES MESURES DE RÉDUCTION DU BRUIT

En 2018 et 2019, l'opérateur suédois Vattenfall remportait les appels d'offres pour les quatre zones du parc de *Hollandse Kust Zuid*, au large des côtes des Pays-Bas, situé à une distance comprise entre 18 et 35 kilomètres du littoral. Ce parc d'une puissance installée de 1,5 GW est composé de 139 éoliennes installées sur des fonds sableux et sédimentaires d'une profondeur comprise entre 17 et 28 mètres. Cette nature de sol implique d'employer la technique du battage des fondations, générant d'importantes nuisances sonores. Pour limiter l'impact de ces travaux, les opérations les plus bruyantes ont été programmées en dehors des périodes de plus forte présence des mammifères marins, en fin d'hiver et au printemps, périodes déterminées lors des inventaires de l'état initial du projet et précédées d'un effarouchement pour éloigner les animaux. Ces mesures ont été accompagnées de la mise en place d'un double rideau de bulles (« double big bubble curtain », *DBBC*) et suivies à l'aide d'hydrophones mesurant le niveau de bruit et permettant d'évaluer la présence de mammifères marins. Les limites réglementaires de bruit sous-marin s'appliquant à ce projet étaient fixées à 173 dB entre juin et août, et 175 dB entre septembre et décembre à 750 mètres du site de battage.

Pour l'installation de chaque monopieu d'un diamètre de 8 mètres, les prévisions acoustiques de l'organisation néerlandaise pour la recherche scientifique appliquée (TNO) ont estimé que le niveau d'exposition sonore brute sans mesures de réduction serait d'environ 183 dB à 750 mètres. Dans un scénario avec réduction du bruit (*DBBC*), les niveaux de bruit prévus étaient de 169 à 170 dB à la même distance

du pieu. Les données issues du suivi de la première campagne de construction ont montré que la moyenne des niveaux de bruit maximaux enregistrés était de 161,5 dB avec la plus forte valeur à 166 dB, ce qui reste en-dessous des niveaux réglementaires. D'ailleurs, certains niveaux de bruit les plus élevés sont dus à une défaillance du dispositif ; un tuyau d'air étant resté posé sur le fond durant plusieurs semaines, il a été partiellement colonisé par des organismes marins bloquant plusieurs orifices d'air.



Construction d'un parc éolien en mer © Vattenfall

RETOUR D'EXPÉRIENCE : SUIVI DES NIVEAUX DE BRUIT SUR UN PROJET EN CONSTRUCTION

Sur le parc éolien en mer au large des Côtes d'Armor, en Bretagne, opéré depuis 2023 par le consortium Ailes Marines, les 62 éoliennes sont posées pour partie sur un substrat granitique très dur, qui impose la technique du forage et sur un sol plus meuble où le battage des pieux était initialement prévu. En raison des forts courants dans la baie et donc de la difficulté d'atténuer la propagation des sons (la principale technique déployée à l'époque, le rideau de bulles, étant sensible au courant), le constructeur a décidé d'utiliser le forage sur toutes les fondations du parc - cette technique étant en effet moins bruyante que le battage.

Le bruit sous-marin a été mesuré pendant les deux années de construction, à l'aide d'une bouée enregistrant en continu le paysage sonore environnant avec un suivi en temps réel. Pour tenir compte des différentes caractéristiques géologiques des fonds marins, le bruit a été suivi au niveau de 9 des 62 fondations installées, dont trois au nord du parc sur de la roche affleurante et sub-affleurante, trois au centre sur des graviers avec débris coquilliers et trois au sud sur un substrat de sable et gravier. Les bilans de 2021 et 2022 des mesures environnementales en construction ont montré que les niveaux sonores mesurés ne sont pas corrélés au type de sol rencontré, ni à la vitesse de rotation de la foreuse. En revanche, le bruit généré par les travaux est principalement associé à l'installation du navire de forage. Les opérations de tranchage, en vue du raccordement électrique, produisent un bruit continu similaire à celui émis par le navire en positionnement dynamique. Les niveaux de bruit dans la colonne d'eau sont globalement comparables à l'émission sonore d'un gros navire de transport, tel qu'un porte-conteneurs.

EFFICACITÉ DES MESURES

Des mesures à l'efficacité variable, dont l'amélioration vise à repousser les limites

La méthode de pose des fondations dans le fond marin étant généralement dépendante de critères géologiques et techniques⁹⁸ et les techniques alternatives de battage de pieux étant encore peu développées⁹⁹, la réduction de la propagation des ondes sonores semble être une approche incontournable pour réduire les impacts liés aux travaux de construction des parcs éoliens en mer. La performance des différentes techniques d'atténuation de la propagation du bruit dépend de nombreux facteurs, notamment des caractéristiques du battage et des dispositifs mis en place. Par ailleurs, toutes les fréquences sonores ne sont pas réduites de la même manière.

Le rideau de bulles, consistant à injecter de l'air sous pression dans un ou plusieurs anneaux de tuyaux perforés autour du pieu, est la technique la plus couramment utilisée, et bénéficie d'un bon niveau de maturité. Elle permet des réductions substantielles du bruit, mesurées entre 10 et 25 dB selon les projets, avec un maximum d'atténuation entre 500 Hz et 2 kHz¹⁰⁰. C'est une mesure qui s'est montrée efficace pour réduire l'impact des activités de battage sur les marsouins¹⁰¹.

98. Biotopie, 2025.
99. CNRS, 2023.

100. Lucke *et al.*, 2011.
101. Dähne *et al.*, 2017.

Néanmoins, cette technique nécessite beaucoup d'énergie pour injecter de grands volumes d'air comprimé, et son efficacité est diminuée par le courant, qui perturbe la remontée des bulles d'air¹⁰².

La technique du bloc isolant, consistant à entourer le pieu d'un tuyau en acier rempli d'air, réduit les émissions sonores des opérations de battage. La réflexion entre l'air, l'acier et l'eau permet une isolation sonore du même ordre de grandeur que le rideau de bulles. L'enveloppe d'acier peut ne pas être remplie d'air, on parle alors de « bar-tardeau », qui permet d'aboutir dans certaines circonstances à des performances similaires¹⁰³. La difficulté d'installation de ces dispositifs et la profondeur d'eau limitée est néanmoins un frein à leur emploi.



Mise en œuvre d'un double rideau de bulles © Vattenfall

Pour pallier les inconvénients du rideau de bulles, en particulier lorsque les courants marins sont trop importants et pour éviter l'usage continu de compresseurs d'air, des filets garnis de ballons élastiques remplis d'air et d'éléments en mousse peuvent être déployés autour du pieu. Ce type de dispositif, appelé « hydro sound damper » (HSD), a aussi l'avantage de contrôler la fréquence de réduction sonore maximale en jouant sur le diamètre des ballons¹⁰⁴. Les inconvénients identifiés à cette méthode sont que le système est coûteux et nécessite de bonnes conditions météorologiques pour son installation.

D'autres méthodes sont en cours de développement, comme celle de la membrane gonflable. Celle-ci consiste à entourer le pieu d'une membrane sur toute sa hauteur qui, une fois gonflée d'air, crée une rupture d'impédance à la façon du bloc isolant. Actuellement au stade de prototype, cette technologie est soutenue par l'Ademe (Agence de la transition écologique) jusqu'à l'achèvement du premier système opérationnel en conditions réelles.

En Belgique, l'effet de la réduction du bruit de battage des pieux a été étudié sur plusieurs parcs éoliens en mer¹⁰⁵. Les données de suivi acoustique des Marsouins communs, un cétacé souvent pris comme référence pour sa sensibilité au bruit sous-marin, ont été exploitées pour évaluer leurs comportements d'évitement de la zone de construction. Celles-ci montrent que le battage des pieux engendre effectivement un dérangement des animaux, dans un rayon de 20 à 25 km autour de la source de bruit. Lorsque les opérateurs mettent en œuvre un double rideau de bulles, le dérangement semble moindre, et de surcroît limité à un rayon d'environ 10 km.

La réduction des impacts liés aux bruits de battage des pieux de parcs éoliens en mer passe également par des mesures complémentaires à l'atténuation des émissions sonores. Tout d'abord, les chantiers doivent être planifiés en dehors des périodes les plus sensibles pour la faune, déterminées en fonction des enjeux de chaque projet à l'issue des études d'impact environnemental. Ensuite, la présence de mammifères marins à proximité d'une zone de chantier peut être évaluée avant et pendant les

102. Matuschek & Betke, 2009.

103. Koschinski & Ludemann, 2013.

104. Elmer & Savery, 2014.

105. Rumes et al., 2021.

travaux, par des observateurs embarqués ou à l'aide de microphones immergés appelés hydrophones. Cette surveillance permet d'attendre un éloignement suffisant des animaux avant le début du battage des pieux, ou d'interrompre les opérations en cas d'entrée de mammifères marins dans la zone d'exclusion. En complément, des effaroucheurs acoustiques (« *pingers* ») peuvent aussi éloigner les animaux sensibles de la zone de travaux. Enfin, la montée en puissance progressive du battage des pieux, couramment appelée « *soft start* », vise à laisser le temps aux animaux de s'éloigner pour leur éviter des lésions auditives. En Europe, ces approches sont très généralement employées pour protéger les mammifères marins, en particulier les dauphins et les marsouins qui sont souvent présents dans les zones d'étude des projets. Il est intéressant de noter que si l'efficacité des *pingers* a été démontrée, en particulier sur les marsouins¹⁰⁶, des phénomènes d'accoutumance peuvent aussi être observés^{107,108}. Enfin, il semblerait que les répulsifs acoustiques destinés aux phoques fassent fortement réagir les marsouins, plus encore que le battage des pieux lorsqu'un rideau de bulles est installé, ce qui justifierait de réévaluer les caractéristiques des sons émis¹⁰⁹.

Pour analyser et mesurer l'impact du bruit sur la faune marine, il est nécessaire de comprendre le rôle et le fonctionnement de la perception sonore des animaux, néanmoins les connaissances restent très incomplètes concernant de nombreux taxons, notamment les invertébrés marins. Ainsi, les effets des bruits anthropiques sur les différents stades du cycle de vie des invertébrés en conditions réelles sont encore mal documentées ; il y a peu d'études exposant des invertébrés marins à de vraies sources sonores anthropiques (bruits de bateaux, battage de pieux, prospections sismiques...) en condition réelles. En outre, les capacités auditives des oiseaux et tortues marines sont encore mal connues. Il est aussi nécessaire d'élargir les études d'impact aux réseaux trophiques, en effet des impacts sur les niveaux les plus bas entraînent certainement des conséquences sur la totalité de l'écosystème, y compris les mammifères et les oiseaux marins. Dans le cas des oiseaux marins en période de reproduction, un déplacement de la ressource alimentaire en raison d'un dérangement induit par le bruit des activités humaines pourrait entraîner des conséquences très importantes sur les colonies¹¹⁰. En ce qui concerne les mammifères marins, là encore les connaissances restent incomplètes, notamment en ce qui concerne leur distribution, leurs déplacements quotidiens et leur réaction face aux différentes activités sonores. Par ailleurs, la compréhension des effets des activités humaines sur ces animaux (oiseaux et mammifères marins) doit nécessairement passer par une analyse réellement exhaustive des impacts cumulés, en tenant compte des collisions avec les navires, des captures accidentelles, des contaminants et des déchets et, dans le cas des parcs éoliens marins, du dérangement lié aux passages des bateaux de maintenance et de visites touristiques¹¹¹. Les futures études d'impact réalisées par les porteurs de projets devraient favoriser l'acquisition de nouvelles données et donc le développement de modèles plus fins de compréhension des impacts¹¹².



Phoques veaux-marins © Paul Bonfils

106. Kastelein *et al.*, 2006.

107. Gordon & Northridge, 2002.

108. Lopez *et al.*, 2011.

109. Dähne *et al.*, 2017.

110. CNRS, 2023.

111. Fontaine *et al.*, 2025

112. Virgili & Ridoux, 2021.

PISTES DE RECHERCHE POUR RÉDUIRE LES MORTALITÉS DE LA FAUNE VOLANTE

LE BALISAGE CIRCONSTANCIÉ, UNE PISTE POUR RÉDUIRE LA MORTALITÉ ET LE DÉRANGEMENT DES CHIROPTÈRES

Les chauves-souris sont sensibles à la mortalité par collision, dont le risque peut être accentué par des comportements d'attraction des éoliennes¹¹³, et à la perte d'utilisation de l'habitat causée par des comportements d'évitement¹¹⁴. Les causes de ces comportements restent méconnues, seuls l'effet de sillage¹¹⁵, la forte densité d'insectes à proximité des turbines¹¹⁶ et la ressemblance des éoliennes avec de grands arbres¹¹⁷ ayant été identifiés comme des mécanismes pouvant expliquer ces phénomènes. Par conséquent, il existe encore très peu de mesures efficaces pour réduire les impacts de l'éolien sur l'utilisation des habitats par les chauves-souris. Le bridage est largement pratiqué, mais il engendre des pertes de productible parfois assez lourdes pour les exploitants de parcs ; sa mise en œuvre pourrait être éventuellement optimisée si les sources d'attraction des chiroptères envers les éoliennes étaient mieux connues et atténuées.

Des suivis acoustiques de l'activité des chiroptères ont été conduits en Allemagne autour d'éoliennes munies d'un éclairage conventionnel, clignotant en continu durant toute la nuit, d'éoliennes équipées d'un système ADLS (« Aircraft detection lighting system ») et dont l'éclairage fonctionne en moyenne 12 % de la nuit, et sur des sites témoins sans parc éolien et de caractéristiques paysagères comparables¹¹⁸. Cette étude fournit la première preuve empirique que le balisage lumineux peut être un important facteur d'attraction des chauves-souris à proximité des éoliennes. La mise en place d'un balisage « circonstancié » de

type ADLS pourrait donc contribuer à atténuer les impacts des éoliennes sur les chiroptères sans pour autant affecter le productible énergétique.

Ces résultats prometteurs devraient être complétés par des études menées à différentes périodes de l'année, puisque les comportements des chauves-souris vis-à-vis des éoliennes semblent varier entre les saisons¹¹⁹, et sur des parcs éoliens implantés dans des paysages et habitats différents¹²⁰. D'autre part, ces suivis acoustiques ont été effectués à hauteur du sol et en dehors de la période de mortalité maximale¹²¹ ; une étude à hauteur de nacelle ou avec un suivi de la mortalité, effectuée à la fin de l'été, permettrait de valider le potentiel de l'ADLS à réduire les mortalités.

Si en France, le balisage lumineux des éoliennes est très réglementé et doit faire l'objet d'un certificat de conformité délivré par le service technique de l'aviation civile, un balisage circonstancié tel que l'ADLS pourrait bénéficier non seulement aux chauves-souris mais aussi à d'autres espèces animales affectées par les collisions, comme les insectes et les oiseaux. En outre, il ne nécessite pas de modifications des éoliennes existantes et plusieurs systèmes certifiés sont déjà disponibles. Enfin, la réduction de l'éclairage artificiel nocturne généré par les parcs éoliens pourrait améliorer l'acceptabilité de ceux-ci par les riverains. Le balisage circonstancié pourrait donc être déployé en combinaison avec d'autres mesures de réduction existantes.

113. Richardson *et al.*, 2021.

114. Barré *et al.*, 2018 ; Gaultier *et al.*, 2023.

115. Leroux *et al.*, 2024.

116. Voigt, 2021.

117. Cryan, 2008.

118. Rapport Chiro-Eolum, Leroux *et al.*, 2024.

119. McKay *et al.*, 2024.

120. Solillo *et al.*, 2024.

121. Rydell *et al.*, 2010.

PISTES DE RECHERCHE POUR RÉDUIRE LES MORTALITÉS DE LA FAUNE VOLANTE



LA COLORISATION DES ÉOLIENNES POURRAIT PERMETTRE D'AMÉLIORER LEUR DÉTECTABILITÉ PAR LES OISEAUX

.....

En France, la réglementation prévoit que l'ensemble des éléments constituant les éoliennes doivent être peints d'une couleur blanche et uniforme. Cependant, la vulnérabilité au risque de collision pourrait être étroitement liée à la perception visuelle des éoliennes par les oiseaux¹²², qui ont en moyenne une appréciation des contrastes largement inférieure à l'homme¹²³.

Pour augmenter la visibilité des éoliennes et donc réduire les risques de mortalité, des chercheurs ont proposé d'appliquer une peinture contrastante sur les machines. En Norvège, sur le parc de Smøla, constitué de 68 éoliennes, une peinture noire appliquée à la base de dix turbines a permis la baisse significative de 48 % des collisions de Lagopèdes des saules sur ces machines¹²⁴. Sur le même parc, un autre projet a étudié l'efficacité de la peinture d'une pale en noir sur quatre machines, obtenant une baisse d'environ 70 % des mortalités d'oiseaux (notamment du Pygargue à queue blanche) par rapport aux autres éoliennes¹²⁵. Une étude ultérieure dans le parc d'Eemshaven, aux Pays-Bas, a été menée sur un échantillon de quatorze éoliennes dont la moitié a reçu une peinture noire sur une pale. Sur les deux années de suivi hebdomadaire des mortalités, 436 cadavres appartenant à 81 espèces ont été découverts au pied des éoliennes, sans que la peinture des pales semble néanmoins avoir un effet statistiquement significatif¹²⁶. En parallèle, une expérimentation en Afrique du Sud sur

quatre éoliennes peintes avec des bandes rouges sur les pales montrait une baisse significative de la mortalité des rapaces, qui représentaient 30 % des collisions constatées¹²⁷.

L'efficacité de la colorisation d'une ou plusieurs pales pour augmenter le contraste des éoliennes semble donc dépendre de nombreux facteurs, tels que les espèces en présence, l'environnement des éoliennes, leur contraste avec le paysage et les éventuelles infrastructures alentours, ou encore la couleur et le motif appliqué sur les pales. La vitesse de rotation des turbines peut également influencer leur détectabilité par les oiseaux, certaines espèces percevant les éoliennes comme stationnaires à de faibles vitesses de rotation (autour de 3 tr/mn) ce qui peut tromper leur appréhension du danger¹²⁸. La peinture d'une ou plusieurs pales avec des couleurs contrastantes reste donc une piste intéressante de recherche pour réduire le risque de collision de l'avi-faune en améliorant la détectabilité des éoliennes, sous réserve d'un assouplissement de la réglementation relative aux obstacles aériens. Néanmoins, de plus amples expérimentations restent à conduire pour mieux comprendre les conditions d'efficacité de cette mesure.

.....

122. Gémard *et al.*, 2024.

123. Blary *et al.*, 2024.

124. Stokke *et al.*, 2020.

125. May *et al.*, 2020.

.....

126. Klop *et al.*, 2025.

127. Simmons, 2025.

128. Blary *et al.*, 2023.

RECOMMANDATIONS

INVESTIR DANS LA SOBRIÉTÉ ÉNERGÉTIQUE ET L'EFFICACITÉ DES USAGES

■ **Préalablement à l'implantation de nouveaux projets d'énergies renouvelables**, veiller à ce que nos besoins énergétiques s'inscrivent dans une trajectoire axée sur la sobriété et l'efficacité énergétiques, à l'échelle collective et individuelle, pour consommer moins et mieux.

PRIORISER UNE MEILLEURE PLANIFICATION ET L'ÉVITEMENT DES IMPACTS

■ **Planifier le développement de l'éolien terrestre et marin** en dehors des aires protégées inscrites à la Stratégie nationale des aires protégées (SNAP) 2030, et conformément aux recommandations de l'UICN.

■ **Interdire l'implantation de parcs éoliens dans des sites à fort enjeu de biodiversité**, en particulier dans les Zones Naturelles d'Intérêt Ecologique, Faunistique et Floristique (ZNIEFF) terrestres et marines.

■ **Interdire l'implantation de projets éoliens au sein des domaines vitaux ou couloirs migratoires** d'espèces menacées ou protégées et/ou bénéficiant d'un Plan national d'actions (PNA). Il est aussi recommandé une attention particulière aux milieux naturels adjacents aux aires protégées et aux corridors écologiques.

■ **Prendre en compte les impacts cumulés** sur la biodiversité des parcs éoliens (éoliennes mais aussi aménagements connexes comme les voies de circulation, les plateformes techniques, les tracés de raccordement) et des autres infrastructures présentes ou en projet dès le stade de la planification afin de mettre en œuvre l'évitement des zones sensibles. Le cumul des impacts doit être pris en compte à l'échelle de la France mais également des pays voisins pour ce qui concerne les voies migratoires des espèces.

■ **Privilégier les mesures d'évitement** en pensant la planification et la conception des parcs au regard des enjeux de conservation (habitats et espèces), par rapport aux mesures de réduction ou de compensation à l'efficacité moins clairement établie.

AMÉLIORER LES CONNAISSANCES SCIENTIFIQUES ET LE DEPLOIEMENT DES TECHNIQUES POUR RÉDUIRE LES IMPACTS DES PARCS ÉOLIENS

■ **Développer la connaissance des espèces**, de leurs comportements et déplacements, de leurs interactions avec les éoliennes et de leurs facteurs de risque de mortalité afin de rechercher des mesures d'évitement et de réduction les plus efficaces.

■ **Poursuivre la recherche sur les impacts** des parcs éoliens sur l'ensemble des écosystèmes dans lesquels ils sont implantés, notamment pour mieux caractériser les effets de perte d'habitats, par exemple liés aux effets de sillage ou aux effets barrière, en particulier dans des secteurs où plusieurs parcs sont implantés.

■ **Poursuivre la recherche sur le rôle et le fonctionnement de la perception sonore** des espèces animales marines, y compris les invertébrés, afin de développer des systèmes de réduction du bruit sous-marin plus efficaces lors de la phase travaux des parcs éoliens en mer.

■ **Accorder un effort de recherche** particulier à l'égard du milieu marin, où la connaissance scientifique reste extrêmement parcellaire, pour mieux comprendre les enjeux et les effets des parcs éoliens et des infrastructures associées.

■ **Poursuivre la recherche sur l'efficacité des mesures de réduction** dans les parcs éoliens, en particulier les mesures à fort potentiel de réduction d'impacts et/ou largement déployées : distance minimale aux lisières et habitats sensibles, hauteur de garde au sol ou de tirant d'air selon le comportement des espèces présentes, arrêt des turbines grâce aux bridages prédictif et dynamique pour limiter les collisions, adaptation du balisage lumineux pour diminuer l'attractivité, colorisation des éoliennes pour améliorer leur détectabilité, etc.

■ **Soutenir le développement technologique et méthodologique** des systèmes de détection des collisions (caméras thermiques, diurnes, capteurs, etc.), qui offrent des perspectives intéressantes.

■ **Soutenir le travail sur les systèmes de détection-réaction** (SDA) pour accompagner la filière éolienne, permettre une montée en compétence des services de l'Etat et définir des exigences de performance claires.

RECOMMANDATIONS

FAVORISER LE PARTAGE, LA TRANSPARENCE ET L'IMPLICATION DES PARTIES PRENANTES À DIFFÉRENTES ÉCHELLES

■ **Etendre le principe du « fonds biodiversité »**, introduit par la loi APER et dédié au financement de projets de restauration de la nature, au financement des observatoires nationaux et à la recherche sur l'atténuation des impacts de toutes les installations d'énergies renouvelables.

■ **Dans le cas de mesures exploratoires dont l'efficacité a été prouvée** expérimentalement (balisage circonstancié, colorisation des éoliennes, etc.), **engager un dialogue** avec les parties concernées dans l'objectif d'un assouplissement de la réglementation pour pouvoir généraliser ces mesures.

■ **Améliorer la rigueur et la précision du protocole de suivi des mortalités** sur les parcs éoliens terrestres, et généraliser l'utilisation d'un outil commun d'estimation de la mortalité réelle comme GenEst (reconnu internationalement comme le plus robuste), sur l'ensemble des parcs éoliens français terrestres.

■ **Améliorer l'accessibilité à l'ensemble des données issues des études d'impact et des suivis** et structurer celles-ci selon les principes « FAIR » (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable). Ceci permettrait de garantir une gestion homogène et cohérente des données, et d'automatiser les analyses comme les calculs d'estimation de la mortalité, simplifiant ainsi le travail des bureaux d'étude et des chercheurs.

■ **Finaliser la mise à jour de la plateforme DEPOBIO** pour permettre l'enregistrement des métadonnées et donc une bancarisation complète des données nécessaires aux travaux de recherche sur les impacts des parcs éoliens sur la biodiversité.

PENSER LA RÉDUCTION DES IMPACTS COMME UNE COMBINAISON DE MESURES ET UNE APPROCHE MULTI-BARRIÈRES.

■ **Intégrer les risques d'atteinte** à l'ensemble des espèces et habitats concernés par chaque projet de parc éolien afin d'y mettre en place plusieurs mesures d'évitement et de réduction complémentaires, en phases de travaux et d'exploitation.

■ **Penser le bridage dynamique** comme un complément au bridage prédictif ; car il ne permet pas de détecter à temps les oiseaux de petite ou moyenne taille ni les chauves-souris en migration, qui sont pourtant très affectés par les éoliennes.

■ **Anticiper l'ensemble des sources de dérangement** potentiel en phase d'exploitation : en particulier sur les parcs éoliens en mer, l'impact dû aux passages des bateaux de maintenance et de visites touristiques, qui ne sont pas soumises aux mêmes obligations légales que les exploitants éoliens, peut être important sur les oiseaux et la faune marine.

BIBLIOGRAPHIE



- Alligand, G., Hubert, S., Legendre, T., Millard, F., Muller, A. (2018). *Évaluation environnementale. Guide d'aide à la définition des mesures éviter, réduire, compenser (ERC)*. CGDD – Cerema – Ministère de la transition écologique.
- Allison, T. D., & Butryn, R. (2020). *Summary of bat fatality monitoring data contained in AWWIC*.
- Bailey, H., Brookes, K. L., Thompson, P. M. (2014). Assessing environmental impacts of offshore wind farms: lessons learned and recommendations for the future. *Aquatic Biosystems*, 10:8
- Ballester, C., Dupont, S., Corbeau, A., Chambert, T., Duriez, O. & Besnard, A. (2024). A standardized protocol for assessing the performance of automatic detection systems used in onshore wind power plants to reduce avian mortality. *Journal of environmental management*. 354. 120437. DOI : 10.1016/j.jenuman.2024.120437
- Barclay, R. M. R. & Harder, L. D. (2003). Life histories of bats: life in the slow lane. *Bat ecology*. University of Chicago Press, Chicago, IL, 798 pp.
- Barré, K., Froidevaux, J. S. P., Sotillo, A., Roemer, C., Kerbiriou, C. (2023). Drivers of bat activity at wind turbines advocate for mitigating bat exposure using multicriteria algorithm-based curtailment. *Science of the Total Environment*, 866, 161404. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.161404
- Barré, K., Kerbiriou, C., Ravache, A., Sotillo, A., Roemer, C., Froidevaux, J., Leroux, C. (2023). *Prise en compte des impacts de l'éolien sur les chiroptères de la planification des projets à la phase d'exploitation. Synthèse du rapport final du projet Eolien et chiroptères (Ademe)*. 15 p.
- Barré, K., Le Viol, I., Bas, Y., Julliard, R., & Kerbiriou, C. (2018). Estimating habitat loss due to wind turbine avoidance by bats: Implications for European siting guidance. *Biological Conservation*, 226, 205–214. DOI : 10.1016/j.biocon.2018.07.011
- Bas, Y., Kerbiriou, C., Roemer, C. & Julien, J. F. (2024). *Vigie-Chiro bat population trends*. Muséum National d'Histoire Naturelle.
- Behr, O., Brinkmann, R., Hochradel, K., Mages, J., Korner-Niuevergelt, F., Niermann, I., Reich, M., Simon, R., Weber, N. & Nagy, M. (2017). Mitigating bat mortality with turbine-specific curtailment algorithms: a model-based approach. *Wind Energy and Wildlife Interactions*, pp.135-160.
- Bennun *et al.* (2021). *Mitigating biodiversity impacts associated with solar and wind energy development. Guidelines for project developers*. Gland, Switzerland: IUCN and Cambridge, UK: The Biodiversity Consultancy.
- Beucher, Y. *et al.* (2022). Programme OPRECh. Optimisation des processus de régulation des éoliennes en faveur des chiroptères : analyse des pratiques nationales, tests expérimentaux et recommandations. 243 p.
- Biotope (2025). *Retours d'expériences sur le suivi des effets des parcs éoliens en mer étrangers sur la biodiversité - Phase 3 – Méthodes de suivi, effets des parcs éoliens en mer sur la biodiversité et mesures ERC*. Office Français de la Biodiversité - 194 p.
- Blary, C. (2023). *Perception visuelle des éoliennes par les oiseaux. Biodiversité et écologie*. Université de Montpellier. NNT : 2023UMONG057
- Blary, C., Bonadonna, F., Dussauze, E., Potier, S., Besnard, A. & Duriez, O. (2023). Detection of wind turbines rotary motion by birds: A matter of speed and contrast. *Conservation Science and Practice*, 5(10), e13022. DOI: 10.1111/csp2.13022
- Blary, C., Duriez, O., Bonadonna, F., Mitkus, M., Caro, S. P., Besnard, A. & Potier, S. (2024). Low achromatic contrast sensitivity in birds: a common attribute shared by many phylogenetic orders. *Journal of Experimental Biology*, 227. DOI: 10.1242/jeb.246342

- Brabant, R. & Degraer, S. (2023). Offshore wind turbine curtailment strategies in North Sea countries to reduce bird collisions. *Memoirs on the marine environment*, Royal Belgian Institute of Natural Sciences.
- Bradarić, M., Kranstauber, B., Bouten, W., & Shammoun-Baranes, J. (2024). Forecasting nocturnal bird migration for dynamic aeroconservation: The value of short-term datasets. *Journal of Applied Ecology*, 61, 1147–1158. DOI: 10.1111/1365-2664.14651
- Bretagnolle, V., Merot, A., Martineau, A., Dedebean, E., Chargé, E., Denebest, E. (2025). Wind turbine threats to bustards: spatially explicit risk modelling from empirical data. *Biological Conservation*, 310, 111391. DOI: 10.1016/j.biocon.2025.111391.
- Carlier, A., Vogel, C., Alemany, J. (2019). *Synthèse des connaissances sur les impacts des câbles électriques sous-marins : phases de travaux et d'exploitation*. Rapport IFREMER. 99 pp.
- Chambert, T. & Besnard, A. (2021). Évaluer l'impact démographique des collisions aviaires avec les éoliennes. *Synthèse des connaissances et recommandations méthodologiques*. CEFE, Montpellier, France – équipe de recherche du projet MAPE (Mortalité Aviaire dans les Parcs Eoliens terrestres en exploitation).
- CNRS (2021). *Impacts acoustiques des projets éoliens en mer sur la faune marine. Compartiments des mammifères marins, des poissons et des invertébrés*. Rapport et synthèse de l'expertise scientifique collective.
- Comité français de l'UICN (2014). *Développement des énergies marines renouvelables et préservation de la biodiversité. Synthèse à l'usage des décideurs*. Paris, France.
- Comité français de l'UICN (2023). *Planification des projets éoliens en mer : 7 recommandations stratégiques pour une prise en compte de la biodiversité dans l'évaluation environnementale*.
- Corbeau, A. & Besnard, A. (2021). *Les systèmes de détection-réaction dans les parcs éoliens, un moyen de réduction des mortalités aviaires. Principes et conseils pour une bonne évaluation*. CEFE, Montpellier, France – équipe de recherche du projet MAPE (Mortalité Aviaire dans les Parcs Eoliens terrestres en exploitation).
- Cryan, P. M. (2008). Mating Behavior as a Possible Cause of Bat Fatalities at Wind Turbines. *The Journal of Wildlife Management*, 72(3), 845–849. DOI: 10.2193/2007-371
- Dähne, M., Tougaard, J., Carstensen, J., Rose, A., Nabe-Nielsen, J. (2017). Bubble curtains attenuate noise from offshore wind farms construction and reduce temporary habitat loss for harbour porpoises. *Marine Ecology Progress Series* 580: 221-237. DOI: 10.3354/meps12257
- Dallet, M., Amouroux, I., Duarte, R., Dufois, F., Dussauze, M., Gonzalez, J.-L., Grouhel, A., Menet, F. (2024). *Évaluation du risque pour les habitats benthiques lié au cumul des rejets issus des systèmes anticorrosion présents au sein des parcs EMR : Zone baie de Seine élargie. Rapport final du projet PolluE-cume*. Ineris – Ifremer, septembre 2024.
- Dangoisse, G., Facq, T., Thauront, M. (2021). *Bridage agricole : une mesure crédible pour réduire la mortalité aviaire ?* Actes du séminaire Eolien et Biodiversité, LPO.
- De Lucas, M., et al. (2008). Collision fatality of raptors on wind farms does not depend on raptor abundance. *Journal of Applied Ecology*, 45, 1645-1703.
- Degraer, S., Brabant, R., Rumes, B. & Vigin, L. (2023). *Environmental Impacts of Offshore Wind Farms in the Belgian Part of the North Sea: Progressive Insights in Changing Species Distribution Patterns Informing Marine Management*. *Memoirs on the Marine Environment*. Brussels: Royal Belgian Institute of Natural Sciences, OD Natural Environment, Marine Ecology and Management, 115 pp.
- Dernouny, M. (2022). *Effets et impacts des parcs éoliens en mer sur l'ichtyofaune et les populations associées. Synthèse bibliographique des suivis écologiques des parcs éoliens opérationnels et contexte du parc éolien en mer du Calvados*. 87 p.

- **Dulac, P. (2008).** *Évaluation de l'impact du parc éolien de Bouin (Vendée) sur l'avifaune et les chauves-souris. Bilan de 5 années de suivi.* Ligue pour la Protection des Oiseaux délégation Vendée/Ademe Pays de la Loire/Conseil Régional des Pays de la Loire, Nantes, 106 p.
- **Elmer K. H., Savery J. (2014).** *New Hydro Sound Dampers to reduce piling underwater noise.* In *Proceedings of INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference, International Institute of Noise Control Engineering*, 249(2), 5551-5560.
- **Esteban, M. D., Lopez-Gutiérrez, J.-S., Negro, V. (2019).** Gravity-based foundations in the offshore wind sector. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7, 64.
- **Ferrão da Costa et al. (2018).** The indirect impacts of wind farms on terrestrial mammals: Insights from the disturbance and exclusion effects on Wolves (*Canis lupus*). *Biodiversity and wind farms in Portugal: Current knowledge and insights for an integrated impact assessment process*, pp. 111-134. Cham, Switzerland: Springer International Publishing.
- **Fontaine M., Jourdan C., Chabrolle A., Doizelet M., Messudom-Gako C., Le Viol I., Thibault M. (2025).** Sensibilité des oiseaux marins, limicoles côtiers et phoques gris aux dérangements d'origine anthropique dans l'archipel des Glénan. *MNHN-CESCO*. 90 p.
- **Frick, W. F. et al. (2017).** Fatalities at wind turbines may threaten population viability of a migratory bat. *Biological Conservation*, 209, 172-177.
- **Friedenberg, N. & Frick, W. (2021).** Assessing fatality minimization for hoary bats amid continued wind energy development. *Biological Conservation*, 262, 109309. DOI : 10.1016/j.biocon.2021.109309
- **Froidevaux, J., Le Viol, I., Barré, K., Bas, Y., Kerbiriou C. (2025).** A modeling framework for biodiversity assessment in renewable energy development: A case study on European bats and wind turbines. *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 211. ISSN: 1364-0321.
- **Gaultier, S. P., Lilley, T. M., Vesterinen, E. J., & Brommer, J. E. (2023).** The presence of wind turbines repels bats in boreal forests. *Landscape and Urban Planning*, 231, 104636. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2022.104636
- **Gaultier, S.P., Marx, G. & Roux, D. (2019).** *Eoliennes 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.
- **Gémard, C., Duriez, O., Chappe, O., Duclos, G., Besnard, A. (2024).** Identifier les conditions augmentant le risque de collision d'oiseaux dans les parcs éoliens : synthèse des connaissances et recommandations méthodologiques. *MSH SUD*, pp.19.
- **Gémard, C., Duriez, O., Chappe, O., Duclos, G., Besnard, A. (2025).** Towards a better understanding of avian collision in wind energy facilities using automatic detection systems. *Journal of Applied Ecology*, DOI: 10.1111/1365-2664.70055.
- **Gigot M. (2022).** *Caractérisation de l'impact acoustique des travaux de battage de pieu et de forage associés à la construction d'éoliennes offshore sur les stades larvaires des bivalves marins Pecten maximus et Venus verrucosa.* Université de Bretagne occidentale, Brest.
- **Gordon J., Northridge S. (2002).** *Potential impacts of acoustic deterrent devices on Scottish marine wildlife.* Commissioned Report, Scottish Natural Heritage, F01AA404, 1-63.
- **Guest, E. E., et al. (2022).** An Updated Review of Hypotheses Regarding Bat Attraction to Wind Turbines. *Animals*, 12(3), 343. DOI:10.3390/ani12030343
- **Gulka, J., Knapp, S., Soccorsi, A., Avery-Gomm, S., Knaga, P., Williams, K. A. (2025).** *Offshore Wind and Aero fauna: Avoidance Remains the Best Bet Amid Limited Mitigation Evidence.* *BioRxiv*, DOI: 10.1101/2024.08.20.608845.
- **Huso, M., Dalthorp, D. (2023).** Reanalysis indicates little evidence in reduction of eagle mortality rate by automated curtailment of wind turbines. *Journal of Applied Ecology*, 60(10), 2282-2288.

- Hutterer, R., Iuanova, T., Meyer-Cordes, C., Rodrigues, L. (2005). Bat migrations in Europe – a review of banding data and literature. *Naturschutz Biologie Vielfalt*, 28.
- IPCC (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 184 pp., DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
- Itty, C. et Duriez, O. (2018). *Le suivi par GPS, une méthode efficace pour évaluer l'impact des parcs éoliens sur des espèces à fort enjeu 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.
- Kastelein, R. A., van der Heul, S., Terhune, J. M., Verboom, W. C., Triesscheijn, R. J. V. (2006). Detering effects of 8-45 kHz tone pulses on harbour seals *Phoca vitulina* in a large pool. *Marine Environmental Research*, 62, 356-373.
- Klop, E., Kleyheeg-Hartman, J., Kappers, E. F., Jennings, L. (2025). *The search for the holy grail: one black rotor blade did not reduce bird mortality in windfarm Eemshaven*. 8th Conference on wind energy and wildlife, Montpellier.
- KNE (2025). *Die Abschaltung von Windenergieanlagen bei Bewirtschaftungsereignissen – Fragen der Umsetzung der Schutzmaßnahme*. 19 S.
- Korner-Niuevergelt, F., Brinkmann, R., Niermann, I., & Behr, O. (2013). Estimating bat and bird mortality occurring at wind energy turbines from covariates and carcass searches using mixture models. *PLOS ONE*, 8(7), e67997. DOI : 10.1371/journal.pone.0067997
- Koschinski S., Lüdemann K. (2013). *Development of noise mitigation measures in offshore windfarm construction*. Report Commissioned by the Federal Agency for Nature Conservation, Bundesamt für Naturschutz, Allemagne, 102 p.
- Lehnert, L. S. et al. (2014). Wind farm facilities in Germany kill Noctule bats from near and far. *PLOS ONE* 9(8): e103106. DOI: 10.1371/journal.pone.0103106
- Leroux, C., Barré, K., Valet, N., Kerbiriou, C., & Le Viol, I. (2024). Distribution of common pipistrelle (*Pipistrellus pipistrellus*) activity is altered by airflow disruption generated by wind turbines. *PLOS ONE*, 19(5), e0303368. DOI : 10.1371/journal.pone.0303368
- Leroux, C., Kerbiriou, C., Barré, K., Le Viol, I., Verniest, F., Larnoy, G., Valet, N. (2024). *Rapport final du projet CHIRO-EOLUM : Effet du balisage LUMineux des EOLiennes sur l'activité des CHIROptères*. 37 p.
- Liu, K., Du, J., Larsén, X. G., & Lian, Z. (2023). Spatiotemporal Variations of Ocean Upwelling and Downwelling Induced by Wind Wakes of Offshore Wind Farms. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(10). DOI: 10.3390/jmse11102020
- López, B. D. & Mariño, F. (2011). A trial of acoustic harassment device efficacy on free-ranging bottlenose dolphins in Sardinia, Italy. *Marine and Freshwater Behaviour and Physiology*, 44:4, 197-208. DOI: 10.1080/10236244.2011.618216
- Lucke K., Lepper P. A., Blanchet M. A., Siebert U. (2011). The use of an air bubble curtain to reduce the received sound levels for harbor porpoises *Phocoena phocoena*. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1305, 3406-3412.
- Mac Call, M., Bernard, A., Grémillet, D. (2025). *Estimer l'impact des effets déplacement et barrière des parcs éoliens en mer sur les oiseaux marins : cas d'étude sur le Fou de Bassan. Rapport final du projet BirdMove*. CEFE – EPHE-PSL – IRD, février 2025.
- Machado, R., Nabo, P., Cardia, P., Moreira, P., Nicolau, P., & Repas-Goncalves, M. (2024). *Bird Curtailment in Offshore Wind Farms: Application of curtailment in offshore wind farms at a sea basin level to mitigate collision risk for birds*. Birdlife Europe and Central Asia and STRIX, Brussels, Belgium. DOI: 10.5281/zenodo.11237120

- Marques, A.T. et al. (2014). Understanding bird collisions at wind farms: and updated review on the causes and possible mitigation strategies. *Biological Conservation* 179: 50-52.
- Marx, G. (2017). *Le Parc éolien français et ses impacts sur l'avifaune. Étude des suivis de mortalité réalisés en France de 1997 à 2015*. LPO France.
- Matuschek R., Betke K. (2009). Measurements of construction noise during pile driving of offshore research platforms and wind farms. In *Proceedings of the NAG/DAGA International Conference on Acoustics in Rotterdam*, 262-265.
- May, R., Nygård, T., Falkdalen, U., Åström, J., Hamre, Ø., & Stokke, B. G. (2020). Paint it black: efficacy of increased wind turbine rotor blade visibility to reduce avian fatalities. *Ecology and Evolution*, 10(16), 8927-8935. DOI : 10.1002/ece3.6592
- McClure, C. J. W., Martinson, L., Allison, T. D. (2018). Automated monitoring for birds in flight: Proof of concept with eagles at a wind power facility. *Biological Conservation*, volume 224, pp 26-33. DOI: 10.1016/j.biocon.2018.04.041.
- McClure, C. J. W., Rolek, B. W., Dunn, L., McCabe, J. D., Martinson, L. & Katzner, T. E. (2021). Eagle fatalities are reduced by automated curtailment of wind turbines. *Journal of Applied Ecology*. 58. DOI: 10.1111/1365-2664.1383.
- McClure, C. J. W., Rolek, B. W., Dunn, L., McCabe, J. D., Martinson, L. & Katzner, T. E. (2022). Confirmation that eagle fatalities can be reduced by automated curtailment of wind turbines. *Ecological Solutions and Evidence*, 3, e12173. DOI : 10.1002/2688-8319.12173.
- McKay, R. A., Johns, S. E., Bischof, R., Matthews, F., Van Der Kooij, J., Yoh, N., & Eldegard, K. (2024). Wind energy development can lead to guild-specific habitat loss in boreal forest bats. *Wildlife Biology*, e01168. DOI: 10.1002/wlb3.01168
- Millon, A., Vallecillo, D., Morcelet, L., Besnard, A., Duriez, O. et al. (2025). *VULNEO : Évaluation de la Sensibilité et de la Vulnérabilité de l'Avifaune aux Infrastructures Éoliennes Terrestres en France Métropolitaine*. IMBE & OFB.
- Ministère de l'Environnement, de l'énergie et de la mer (2017). *Guide d'évaluation des impacts sur l'environnement des parcs éoliens en mer*.
- Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer (2017). *Plan national d'actions en faveur des chiroptères, 2016-2025*.
- Miquerol, L., Bultel, E., Michel, S., Coz, R., La Rivière, M., Sauboua, P. (2023). *Référentiel pour la préservation de l'environnement marin dans les projets d'éoliennes en mer. TOME 2. Interactions entre les projets d'éoliennes en mer et le milieu marin – avec focus sur les habitats benthiques de métropole et les espèces Natura 2000*. Office français de la biodiversité. 896 pp.
- Newton, I. (2010). Bird migration. *British Birds*, 103:413-6.
- Peraudeau, N., Aubriot, E., Dabiens, C., Le Strat, A., Pruchon, A., Robert, J-G., Taleb, I., Audier, A. (2024). *Évolution des coûts des énergies renouvelables et de récupération en France entre 2012 et 2022*. Ade-me, EY, BCG, 188 p.
- Préfet des Bouches-du-Rhône (2019). Arrêté préfectoral n°82-2017-EA autorisant au titre de l'article L.214-3 du code de l'environnement la société Parc Eolien Offshore de Provence Grand Large à construire et exploiter un parc éolien en mer au large de la commune de Port-Saint-Louis-du-Rhône.
- Printz, L., Tschapka, M., Vogeler, A. (2021). The common Noctule Bat (*Nyctalus noctula*): population trends from artificial roosts and the effects of biotic and abiotic parameters on the probability of occupation. *Journal of Urban Ecology*, 7(1), juab033.
- Quinard, A., Dupuis, L., Hette-Tronquart, N., Besnard, A., Jactel, H., Langridge, J. (2024). *Efficacité des solutions et bonnes pratiques mises en place pour limiter l'impact de l'énergie éolienne terrestre sur la biodiversité. Synthèse des connaissances*. Paris, France : Fondation pour la Recherche sur la Biodiversité.

- Rabie, P. A., Welch-Acosta, B., Nasman, K., Schumacher, S., Schueller, S., Gruver, J., 2022. Efficacy and cost of acoustic-informed and wind speed-only turbine curtailment to reduce bat fatalities at a wind energy facility in Wisconsin. *PLOS ONE*, 17, 1-16. DOI: 10.1371/journal.pone.0266500
- Ravache, A., Barré, K., Normand, B., Goislot, C., Besnard, A., & Kerbiriou, C. (2024). Monitoring carcass persistence in windfarms: Recommendations for estimating mortality. *Biological Conservation*, 292, 110509. DOI: 10.1016/j.biocon.2024.110509
- Reichenbach, M., et al. (2023). Kamera- und Radar-Datenauswertung: Durchführung von Leistungsnachweisen für Detektionssysteme zur Verminderung von Vogelkollisionen an Windenergieanlagen in Brandenburg. The Regional Planning and Environmental Research Group, Oldenburg.
- Richardson, S. M., Lintott, P. R., Hosken, D. J., Economou, T., & Mathews, F. (2021). Peaks in bat activity at turbines and the implications for mitigating the impact of wind energy developments on bats. *Scientific Reports*, 11(1), 3636. DOI : 10.1038/s41598-021-82014-9
- Riols-Loyrette, C. (2015). Impact de parcs éoliens sur un couple d'Aigle royal *Aquila chrysaetos* dans les Corbières. *Ornithos* 22(4) : 196-207.
- Roemer, C., Disca, T., Coulon, A., & Bas, Y. (2017). Bat flight height monitored from wind masts predicts mortality risk at wind farms. *Biological conservation*, 215, 116-122.
- Roemer, C., Disca, T., Coulon, A., Bas, Y. (2017). Bat flight height monitored from wind masts predicts mortality risk at wind farms. *Biological Conservation*, 215, 116-122. DOI: 10.1016/j.biocon.2017.09.002
- Roy, A., Désert, T., Delcourt, V., Bon, C., Schmid, B. (2024). Enhanced forecasting of bird nocturnal migration intensity in relation to previous days and synoptic weather patterns. *International Journal of Biometeorology*.
- Royal Haskoning DHV (2020). *Update on the Current state of Knowledge on the Environmental Impacts of Offshore Wind Farms*.
- Rumes, B., Zupan, M. (2021). Effects of the use of noise-mitigation during offshore pile driving on harbour porpoise (*Phocoena phocoena*), in: Degraer, S. et al. *Environmental impacts of offshore wind farms in the Belgian part of the North Sea: Attraction, avoidance and habitat use at various spatial scales. Memoirs on the Marine Environment*: pp. 19-31.
- Rydell, J., Bach, L., Dubourg-Savage, M., Green, M., Rodrigues, L., Hedenström, A. (2010). Bat Mortality at Wind Turbines in Northwestern Europe. *Acta Chiropterologica*, 12(2), 261-274. DOI: 10.3161/150811010X537846
- Rydell, J., Bach, L., Dubourg-Savage, M.-J., Green, M., Rodrigues, L., & Hedenström, A. (2010). Bat Mortality at Wind Turbines in Northwestern Europe. *Acta Chiropterologica*, 12. DOI: 10.3161/150811010X537846
- Sand, C.-A., Normand, B., Kerbiriou, C., Barré, K., & Ravache, A. (2024). Suivis réglementaires de la mortalité dans les parcs éoliens : de l'analyse locale à l'approche intégrée. *Sciences Eaux & Territoires*, (46), article 8312. DOI : 10.20870/Revue-SET.2024.46.8312
- SDES (2025). *Chiffres clés de l'énergie, édition 2025*.
- Simmons, R. (2025). *Crouching Tiger, Hidden Dangers: Blade patterning reduces avian impacts at a species rich African wind farm*. 8th Conference on wind energy and wildlife, Montpellier.
- Singh, K., Baker, E. D., Lackner, M. A. (2015). Curtailing wind turbine operations to reduce avian mortality. *Renewable Energy*, vol. 78, 351-356. DOI: 10.1016/j.renene.2014.12.064
- Smallwood, K.S. (2020). Dogs Detect Larger Wind Energy Effects on Bats and Birds. *The Journal of Wildlife Management* 84(5):852–864.
- Sotillo, A., Le Viol, I., Barré, K., Bas, Y., & Kerbiriou, C. (2024). Context-dependent effects of wind turbines on bats in rural landscapes. *Biological Conservation*, 295, 110647. DOI: 10.1016/j.biocon.2024.110647

■ Thaxter Chris B. *et al.* (2017). *Bird and bat species' global vulnerability to collision mortality at wind farms revealed through a trait-based assessment*. *Proc. R. Soc. B.* 284: 20170829. DOI: 10.1098/rspb.2017.0829

■ Thompson, M., Beston, J. A., Etterson, M., Diffendorfer, J. E., Loss, S. R., (2017). Factors associated with bat mortality at wind energy facilities in the United States. *Biol. Conserv.* 215, 241-245. DOI: 10.1016/j.biocon.2017.09.014

■ Van der Meij, T., Van Strien, A. J., Haysom, K. A., Dekker, J., Russ, J., Biala, K. & Vintulis, V. (2015). Return of the bats? A prototype indicator of trends in European bat populations in underground hibernacula. *Mammalian Biology*, 80(3), 170-177.

■ Virgili, A., Ridoux, V. (2021). *Développement méthodologique pour évaluer l'impact cumulé lié au bruit généré durant la construction de parcs éoliens en mer sur le marsouin en Manche sans prise en compte de mesures ERC. Rapport d'analyse, projet Bruicume. Observatoire Pelagis, La Rochelle Université, septembre 2021.*

■ Voigt, C. C., Dekker, J., Fritze, M., Gazaryan, S., Höller, F., Jones, G. & Zagmajster, M. (2021). The Impact of Light Pollution on Bats Varies According to Foraging Guild and Habitat Context. *BioScience*, 71(10). DOI: 10.1093/biosci/biab087

■ Voigt, C., Kaiser, K., Look, S., Scharnweber, K., Scholz, C. (2022). Wind turbines without curtailment produce large numbers of bat fatalities throughout their lifetime: A call against ignorance and neglect. *Global Ecology and Conservation*, 37: e02149.

■ Voigt, C.C., Rehnig, K., Lindecke, O., Petersons, G. (2018). Migratory bats are attracted by red light but not by warm-white light: Implications for the protection of nocturnal migrants. *Ecology and Evolution*, 8, 9353–9361. DOI: 10.1002/ece3.4400

■ Whitby, M. D., Schirmacher, M. R., Frick, W. (2021). The State of the Science on operational minimization to reduce Bat fatality at wind energy facilities. A report submitted to the National Renewable Energy Laboratory. *Bat Conservation International*. Austin, Texas.





LE COMITÉ FRANÇAIS DE L'UICN EST LE RÉSEAU DES ORGANISMES ET DES EXPERTS DE L'UNION INTERNATIONALE POUR LA CONSERVATION DE LA NATURE EN FRANCE.

Créé en 1992, il regroupe, au sein d'un partenariat original, 2 ministères, 7 organismes publics, 8 collectivités locales, 62 organisations non gouvernementales et plus de 300 experts rassemblés au sein de commissions thématiques et de groupes de travail. Par cette composition mixte, le Comité français de l'UICN est une plateforme unique de dialogue, d'expertise et d'action sur les enjeux de la biodiversité.

Depuis plusieurs années les groupes thématiques multi-acteurs « Énergies renouvelables, Occupation du sol et biodiversité » (créé en 2018) et « Énergies marines renouvelables » (créé en 2011) se consacrent à la problématique de la planification des énergies renouvelables terrestres et marines en lien avec les objectifs préservation de la biodiversité.



Comité français de l'UICN

259-261 rue de Paris
93100 Montreuil

France

www.uicn.fr