



Eoliennes & biodiversité

***Synthèse des connaissances sur les impacts
sur l'avifaune et les chiroptères et les
moyens de les atténuer***

&

***Cahier de recommandations de la LPO pour
limiter l'impact de l'éolien en mer sur
l'avifaune et les chiroptères***

Avril 2024



lpo.fr

Crédit photo de la 1^{ère} de couverture : Ian Dyball



RECOMMANDATIONS POUR LIMITER L'IMPACT DE L'EOLIEN EN MER SUR L'AVIFAUNE ET LES CHIROPTERES

Avril 2024



Complément à la synthèse de connaissances : LPO, Eoliennes en mer et biodiversité. Synthèse des connaissances sur les impacts sur l'avifaune et les chiroptères et les moyens de les atténuer, 2024. p. 80.



La LPO préconise une approche très précautionneuse du déploiement de l'éolien en mer, assortie d'une démarche volontariste de protection des milieux marins.

Agir pour enrayer le déclin alarmant de la biodiversité est le cœur de la mission de la LPO.

De très nombreuses espèces marines sont déjà fortement menacées. Les oiseaux marins et les migrateurs terrestres ne font pas exception. Ces derniers sont des usagers intenses ponctuels des espaces marins lors de leurs deux voyages migratoires annuels. Ils représentent une large part du nombre d'oiseaux survolant les mers. Compte tenu des risques inhérents de la migration (prédation, épuisement, blessures, etc.), et des intenses pressions qu'ils subissent également à terre (sur leurs habitats notamment), toute pression additionnelle représente un risque à évaluer avec sérieux.

Les oiseaux marins, constituent l'un des groupes d'oiseaux les plus menacés au niveau mondial¹, notamment du fait des captures importantes par la pêche (filets, hameçons, etc.), des différentes pollutions du milieu marin et notamment de la pollution plastique, de l'épuisement des populations de proies qu'ils consomment (notamment du fait de la surexploitation des espaces marins), des épizooties telles celles de la grippe aviaire, etc. Une industrialisation intense et continue des espaces marins côtiers va leur porter un coup très fort alors que leurs populations sont déjà en forte diminution.

De manière préoccupante, les changements climatiques représentent une menace émergente sur la biodiversité marine, menace qui s'additionne aux nombreuses déjà existantes (pollution, surexploitation, dégradation et fragmentation des habitats...). Les scientifiques alertent sur le fait que le dérèglement climatique a d'ores et déjà des effets sur les écosystèmes marins et ceux-ci devraient s'accroître dans l'avenir avec des conséquences irréversibles si les politiques d'atténuation ne sont pas à la hauteur.

L'augmentation de la part d'énergies renouvelables (EnR) dans le mix énergétique, en substitution des énergies fossiles est l'un des leviers de diminution des gaz à effet de serre responsables du dérèglement climatique. Dans ce mix, l'éolien en mer a certainement un rôle à jouer.

La transition énergétique doit cependant se faire dans le respect le plus exemplaire de la séquence Eviter-Réduire-Compenser.

À ce titre, la première mesure d'évitement est bien de réduire nos besoins en énergie : la LPO demande la mise en place de plans exigeants de sobriété et d'efficacité énergétique, menés dans une logique de justice sociale. L'ampleur de nos besoins finaux de production électrique doit aussi pouvoir être questionnée.

¹ Dias MP, Martin R, Pearmain EJ, Burfield IJ, Small C, Phillips RA, et al. Threats to seabirds: A global assessment. Biol Conserv. 1 sept 2019;237:525-37



L'ÉOLIEN EN MER ENGENDRE DE MULTIPLES EFFETS QUI NÉCESSITENT D'ÊTRE MIEUX DOCUMENTÉS PAR LA SCIENCE

... sur les oiseaux

La Synthèse des connaissances sur les impacts de l'éolien en mer sur l'avifaune et les chiroptères publiée par la LPO en avril 2024 met en évidence un **risque réel de collision des oiseaux marins et migrateurs terrestres avec les éoliennes en mer**. Cet effet pourrait entraîner une surmortalité inquiétante pour des espèces à l'état de conservation dégradée. Les événements météorologiques extrêmes en mer sont susceptibles de causer des pics de mortalité avec des conséquences sur l'état de conservation des populations d'oiseaux. **Le manque de données de terrain ne permet pas de calibrer les modèles actuels de prévision de cette mortalité de manière suffisamment fiable**. Il convient donc d'être prudent dans l'interprétation des résultats aujourd'hui publiés, qui pourraient tendre à sous-estimer les impacts réels.

Différentes espèces montrent une tendance à l'évitement partiel ou total des parcs éoliens. Si cet évitement par certaines espèces réduit le risque de collisions, il entraîne en revanche d'autres impacts. En effet, les parcs éoliens peuvent constituer un obstacle au vol et entraîner des pertes d'habitat pour de nombreuses espèces d'oiseaux marins mais aussi des migrateurs terrestres. Même si leur ampleur reste difficile à estimer, il est clair que les effets « déplacement » (perte d'habitat) et « barrière » des parcs éoliens marins engendrent des impacts sur les populations d'oiseaux. Contourner les parcs qui font obstacle, dans un contexte de multiplication des projets éoliens en mer en France et en Europe, demande aux oiseaux de dépenser de l'énergie supplémentaire et affecte leur santé et leurs chances de se reproduire. Les impacts cumulés des parcs éoliens marins pourraient donc être significatifs. Il apparaît en tout cas que ces effets ont probablement des impacts sur les taux de survie des adultes et des juvéniles.

Préconisations et demandes :

- Veiller à ce que les modèles d'estimations des risques de collision utilisent des données spécifiques au site d'implantation du parc éolien en mer.
- Encourager le développement et la maritimisation de radars, caméra, et enregistreurs acoustiques permettant la détection des collisions.
- Mettre en œuvre des protocoles harmonisés de suivi avant-après solides (avec une méthode par gradient notamment) de la répartition des oiseaux dans et autour de la zone du parc, couplés à des études télémétriques.
- Améliorer les connaissances sur l'ampleur spatio-temporelle de l'effet de déplacement, et les conséquences de ce dernier sur les dynamiques de population.

... sur les chauves-souris

Les chauves-souris sont aussi exposées à des risques, certaines espèces fréquentant l'espace maritime. La fréquence de présence en mer des chauves-souris est encore peu étudiée. En plus du risque de collisions, les changements de pression engendrés par la rotation des pales à proximité des éoliennes peuvent leur causer des lésions internes létales (barotraumatisme). **L'ampleur de ces risques est très mal connue et il convient d'être vigilant quant aux impacts potentiellement importants du développement de l'éolien en mer sur ces petits mammifères à l'état de conservation préoccupant.**



Pour l'éolien terrestre, un grand nombre d'études menées dans différentes régions du monde montrent que ces installations pourraient menacer la viabilité de certaines populations et entraîner un risque accru d'extinction.

Préconisations et demandes :

- Mener de plus amples recherches sur les impacts de l'éolien en mer sur les espèces de chiroptères.

... et sur de nombreuses espèces et habitats.

Les parcs éoliens en mer ont aussi des incidences sur les fonds marins et la colonne d'eau. Parmi celles-ci, les fondations des éoliennes (technologie posée) et les câbles tassent localement les sédiments et engendrent une perte d'habitat benthique. Au niveau de la colonne d'eau, la présence physique des infrastructures immergées représente un obstacle pour les courants marins, modifiant la répartition du plancton et le déplacement des espèces qui dérivent au gré des courants. Les structures immergées sont aussi susceptibles de créer des risques de collision ainsi que d'enchevêtrement pour les mammifères marins, les poissons les tortues et les oiseaux marins qui plongent sous la surface. Cette liste, non-exhaustive, rappelle que, au-delà des éléments contenus dans cette synthèse et ces recommandations les incidences de l'éolien en mer concernent tous les compartiments des écosystèmes marins, et sont loin d'être encore bien compris et mesurés.

DES EFFETS QUI SE CUMULENT

Les connaissances sur l'ensemble de ces effets sur la faune volante qui surviennent dans le compartiment aérien sont aujourd'hui limitées. Elles ne permettent pas de connaître leur ampleur réelle et d'en inférer les impacts démographiques. Avec la multiplication des parcs éoliens, mesurer isolément les effets d'un parc éolien sur une population d'oiseaux dont la répartition géographique est bien plus large où sont implantés plusieurs parcs, n'a plus beaucoup de sens.

Au-delà de la faune volante, le développement de l'éolien en mer a des effets sur de nombreuses espèces marines mobiles (mammifères marins, tortues...) mais aussi les invertébrés et les fonds marins, sur lesquels les connaissances sont lacunaires.

Préconisations et demandes :

- Conduire des études à l'échelle des aires géographiques pertinentes, dans un travail de coopération scientifique entre plusieurs pays.
- Élargir le champ géographique d'analyse de ces impacts aux tracés migratoires et à l'ensemble des zones fonctionnelles des espèces qui ne sont présentes qu'une partie de leur cycle annuel sur le site du parc éolien.
- Ne pas conclure à l'absence d'impacts démographique sur les populations avifaunistiques en l'absence d'étude sur le cumul dans le temps et dans l'espace des effets de l'éolien en mer.



LIMITER CES EFFETS NECESSITE UNE APPROCHE PRECAUTIONNEUSE, FONDEE AVANT TOUT SUR L'EVITEMENT DES ZONES D'IMPORTANCE POUR LA FAUNE VOLANTE

Eviter les zones à forts enjeux environnementaux : une priorité absolue

Sur la base des connaissances scientifiques disponibles, le **choix des zones d'implantation des parcs éoliens en mer** apparaît comme le **paramètre déterminant** pour assurer le bon état écologique (BEE) du milieu marin.

La priorisation des enjeux écologiques dans la phase de planification doit être pleinement garantie. Elle ne peut l'être qu'en finançant des programmes de recherche ambitieux sur le comportement et la distribution des espèces en mer et en prenant en compte leurs résultats. Lorsque des données suffisantes sont disponibles, la spatialisation des risques d'effets de l'éolien en mer sur les espèces peut permettre d'identifier les zones à éviter. En l'absence des résultats des études lancées dans le cadre de l'Observatoire de l'éolien en mer, de telles données sont aujourd'hui insuffisantes. Différents programmes de recherches ont été lancés dans le cadre de l'observatoire de l'éolien en mer. Deux études sur la faune volante, visant à caractériser leur utilisation de l'Arc Atlantique (MIGRATLANE) et du Golfe du Lion (MIGRALION), sont notamment en cours de réalisation.

Préconisations et demandes :

- La LPO s'oppose à l'implantation d'éoliennes en mer dans des aires marines protégées, ainsi que dans tous les espaces vitaux (sites de nidification, d'alimentation ou d'hivernage) et les voies de déplacement des espèces sensibles ou à enjeux.
- La LPO rappelle que l'application de la séquence ERC aux documents de planification des activités maritime est une obligation réglementaire et que c'est bien à l'Etat en premier lieu qu'il revient la responsabilité de l'évaluation des solutions alternatives au développement d'activités ayant un impact sur la biodiversité.

Des marges incertaines de réduction des risques de collision et de dérangement

La minimisation des risques consiste, dès la phase de conception du parc éolien en mer, en l'adoption de choix qui réduisent ses potentiels impacts. Il est **difficile de se prononcer sur l'efficacité de la plupart des moyens de réduction des impacts mentionnés dans une littérature qui reste mince**. Il importe donc de continuer les recherches sur la pertinence des différentes mesures mentionnées dans la littérature.

Plusieurs paramètres peuvent être optimisés pendant la phase de conception du parc afin que son empreinte soit réduite, notamment ce qui relève du micro-aménagement, c'est-à-dire de la configuration du parc (disposition et espacement des éoliennes, en augmentant sa perméabilité), de la taille des turbines et de la hauteur de garde (espace situé entre le niveau de la mer et le bas des pales).



D'autres mesures de réduction des effets sur la faune volante sont envisagées : des actions de réduction des facteurs d'attraction, des actions d'augmentation de la visibilité et du contraste des éoliennes dans l'environnement et des actions répulsives, mais leur efficacité en conditions réelles reste à confirmer.

La mise à l'arrêt ou la baisse de la vitesse de rotation du rotor, qui sont appelées mesures de bridage, constituent également un potentiel levier de réduction de la mortalité liée à l'effet de collision. Des protocoles de bridage des éoliennes lors des pics de fréquentation des parcs commencent à être mis en œuvre en Europe. Leur efficacité devra être mesurée au long court.

Préconisations et demandes :

- Mener davantage d'études sur les modalités de disposition des turbines au sein des parcs, notamment pour créer une plus grande perméabilité (couloirs de circulations) et ainsi atténuer les effets déplacement et barrière.
- La LPO recommande l'adoption de choix qui réduisent les impacts potentiels de l'éolien en mer, en particulier pour l'effet collisions, via la conception d'éolienne ayant une hauteur de 35m à 40 m minimum de hauteur de garde. Ces dimensions doivent être adaptées pour chaque parcs en fonction du contexte écologique et technique.
- L'effet de l'augmentation du diamètre du rotor et donc de la hauteur maximale des pales sur le risque de collision des oiseaux volant en altitude doit être davantage étudié.
- Mener davantage de recherches scientifiques sur le levier de limitation de la photo-attraction et l'augmentation de la visibilité des éoliennes, et tester en conditions réelles l'efficacité des solutions aujourd'hui proposées.
- La LPO recommande l'établissement, en amont de la construction d'un parc, d'une stratégie de bridage obligatoire et évolutive. Les seuils de mortalité à ne pas franchir devront être guidés par la science la plus récente et actualisés si besoin tout au long de la phase d'exploitation du parc.

Un renforcement nécessaire de la protection des milieux marins

L'efficacité des mesures compensatoires en mer est à ce jour impossible à démontrer. De nombreuses mesures de compensation devraient ainsi être considérées à ce stade comme des mesures d'accompagnement et non de compensation (au sens de la loi). Restaurer nos écosystèmes marins dégradés dans un contexte de déploiement massif de l'éolien en mer repose sur une **approche stratégique et intégrée, fondée sur un réseau d'aires marines effectivement protégées des pressions anthropiques, et la réduction partout ailleurs dans nos espaces maritimes des impacts de toutes les activités actuelles et futures.**

Préconisations et demandes :

- La LPO, sur la base des connaissances scientifiques actuelles, considère avec une grande réserve les mesures présentées comme compensatoires pour l'éolien en mer.
- Envisager la compensation des impacts cumulés de l'ensemble des pressions anthropiques sur les oiseaux et chiroptères, au niveau de la planification maritime à l'échelle des façades ou des zones biogéographiques.



- Porter une attention particulière à ce que les mesures mises en place par des opérateurs de projet ne se substituent pas aux mesures de conservation et d'atteinte du bon état écologique du milieu marin, qui découlent d'obligations légales et doivent être définies dans les DSF.
- Privilégier des mesures de restauration passive, c'est-à-dire de modification des pratiques de gestion (par exemple en créant de nouvelles ou en proposant l'extension des AMP), pour diminuer les pressions sur le milieu marin.

Préconisation générale :

La création en 2022 de l'Observatoire de l'éolien en mer (OEM)² répond au souhait exprimé de longue date par les associations dont la LPO. C'est un outil privilégié pour mesurer les incidences environnementales liées à l'exploitation des parcs éoliens en mer. La LPO appelle à ce qu'un budget suffisant lui soit alloué et sécurisé dans la durée, afin de permettre un suivi au long cours, et rappelle qu'il est impératif que les résultats des recherches de l'OEM soient pleinement pris en compte dans la planification de l'éolien en mer.



² Plus d'informations sur le site internet de l'OEM : <https://www.eoliennesenmer.fr/>



ÉOLIENNES EN MER & BIODIVERSITÉ

Synthèse des connaissances sur les impacts
sur l'avifaune et les chiroptères et les moyens
de les atténuer



Eoliennes en mer et biodiversité.

Synthèse des connaissances sur les impacts sur l'avifaune et les chiroptères
et les moyens de les atténuer.

Avril 2024 – LPO France

Rédaction

Clara GERVAISE-VOLAIRE

Enora TREDAN

Comment citer : LPO, Eoliennes en mer et biodiversité. Synthèse des connaissances sur les impacts sur l'avifaune et les chiroptères et les moyens de les atténuer, 2024. 80 p.

Cette synthèse a été réalisée avec le soutien de l'ADEME



LPO France
8 rue du Dr Pujos
CS 90263
17305 Rochefort Cedex



Remerciements

La présente synthèse a été réalisée par la LPO. Les auteurs remercient particulièrement à Martha Mac Call, Thierry Chambert, Christine Jean, Dominique Chevillon, Alexandre Van Der Yeught, Louis Dorémus, Solène Krawczyk, Alban Viaud, Cédric Marteau, Anne-Gaëlle Verdier, pour leur aide, leur relecture et les conseils apportés.

Le LPO remercie également l'ADEME qui accompagne financièrement le programme éolien et biodiversité depuis des années.

Crédit photo de couverture

Ian Dyball/Isostock Photo, Trio of birds

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES	4
PROPOS PRÉLIMINAIRES	5
INTRODUCTION	7
CHAPITRE 1 - CARACTÉRISATION DES IMPACTS SUR L'AVIFAUNE ET LES CHIROPTÈRES DANS LE COMPARTIMENT AÉRIEN : MÉTHODES, ÉTAT DES CONNAISSANCES ET LIMITES	12
Partie 1 – Impacts sur les oiseaux marins et les oiseaux terrestres migrateurs	12
A) Une mortalité directe : l'effet « collision ».....	13
B) Effets de dérangement de l'avifaune.....	22
C) Impacts cumulés.....	32
Partie 2 – Impacts sur les chiroptères	41
A) Effet « Collision ».....	42
B) Barotraumatisme.....	44
C) Estimation des impacts sur les populations de chiroptères.....	44
CHAPITRE 2 - MOYENS D'ATTENUATION DES IMPACTS DE L'ÉOLIEN EN MER SUR L'AVIFAUNE ET LES CHIROPTÈRES	46
A) Éviter les zones sensibles : le moyen le plus efficace de réduire les impacts.....	46
B) Réduire les risques de collision et de dérangement sur l'avifaune et les chiroptères.....	48
C) La difficulté de compenser les impacts résiduels sur l'avifaune et les chiroptères.....	58
Conclusion	63
Bibliographie	66

PROPOS PRÉLIMINAIRES

En 2023, le gouvernement français a acté le choix d'accélérer le déploiement de l'éolien en mer avec un objectif de 45 GW de puissance installée à horizon 2050. En 2024, la planification de l'éolien en mer est ainsi en phase d'accélération. Pour la LPO, la transition énergétique, bien que nécessaire, ne doit néanmoins en aucun cas nuire à l'état écologique des milieux terrestres comme marins, ainsi qu'aux espèces associées.

En raison de leur cycle de vie partagé entre la mer et la terre, les oiseaux marins sont déjà confrontés à de nombreuses menaces dans les deux milieux. Ils constituent ainsi l'un des groupes de vertébrés le plus menacé au niveau mondial et celui qui décline le plus rapidement en Europe ; les tendances sont également alarmantes pour la plupart des oiseaux limicoles nicheurs, les oiseaux migrateurs et les chiroptères utilisant le milieu marin.

Aussi, avant même de limiter l'impact de notre consommation énergétique, il est fondamental de réduire nos besoins en énergie : la LPO demande la mise en place de plans exigeants de sobriété et d'efficacité énergétique, menés dans une logique de justice sociale.

Dans l'objectif d'évaluer les impacts de l'éolien en mer sur la faune volante et les potentiels moyens de les atténuer afin que la transition énergétique ne s'opère pas au détriment de la biodiversité, la LPO a souhaité mener, ces derniers mois, un travail de synthèse bibliographique.

Les parcs éoliens en mer ont aussi des incidences sur les fonds marins et la colonne d'eau. Parmi celles-ci, les fondations des éoliennes (technologie posée) et les câbles tassent localement les sédiments et engendrent une perte d'habitat benthique. Au niveau de la colonne d'eau, la présence physique des infrastructures immergées représente un obstacle pour les courants marins, modifiant la répartition du plancton et le déplacement des espèces qui dérivent au gré des courants. Les structures immergées sont aussi susceptibles de créer des risques de collision ainsi que d'enchevêtrement pour les mammifères marins, les poissons les tortues et les oiseaux marins qui plongent sous la surface. Cette liste, non-exhaustive, rappelle que, au-delà des éléments contenus dans cette synthèse les incidences de l'éolien en mer concernent tous les compartiments des écosystèmes marins, et sont loin d'être encore bien comprises et mesurées.

Les principales conclusions de cette synthèse portent sur des impacts certains et un manque considérable de données scientifiques pour les quantifier. Il est difficile de se prononcer sur l'efficacité de la plupart des moyens de réduction des impacts mentionnés dans une littérature qui reste mince. L'efficacité des mesures compensatoires en mer est par ailleurs à ce jour impossible à démontrer.

Les conclusions de cette synthèse imposent de respecter scrupuleusement la séquence Eviter-Réduire-Compenser dans le déploiement de l'éolien en mer et d'éviter les cœurs de Nature regroupés en France par différents statuts d'Aires Marines Protégées (Natura 2000, Réserve naturelle, Parc Marin...). Elles imposent également d'éviter tous les espaces vitaux (sites de nidification, d'alimentation ou d'hivernage) et les voies de déplacement des espèces sensibles ou à enjeux. Sur la base des connaissances scientifiques disponibles, le choix des zones d'implantation des parcs éoliens en mer apparaît en effet comme le paramètre déterminant pour assurer le bon état écologique (BEE) du milieu marin.

La LPO demande que les résultats des études lancées dans le cadre de l'Observatoire de l'éolien en mer et notamment des études Migratlane et Migralion, soient pleinement pris en compte dans les processus de planification de l'éolien en mer. Il convient également de définir une nouvelle méthode permettant de mesurer les impacts cumulés à l'échelle des voies de migrations des différentes espèces marines concernées et d'approfondir la connaissance de l'efficacité des mesures de réduction des impacts de l'éolien en mer aujourd'hui proposées.

Enfin, plutôt que de traiter séparément les impacts spécifiques de l'éolien en mer, la LPO demande que soient évalués les impacts cumulés de l'ensemble des pressions anthropiques sur les oiseaux et chiroptères, au niveau de la planification maritime, à l'échelle des façades ou des zones biogéographiques, et ce dans une perspective d'atteinte du bon état écologique marin.

La restauration de nos écosystèmes marins dégradés dans un contexte de déploiement massif de l'éolien en mer doit reposer nécessairement sur une approche stratégique et intégrée, fondée sur un réseau d'aires marines effectivement protégées des pressions anthropiques, ainsi que sur la réduction, partout ailleurs dans nos espaces maritimes, des impacts de toutes les activités actuelles et futures.

La présente synthèse, fait état de la bibliographie sans engager le positionnement de la LPO sur le sujet. Elle s'accompagne complémentaires d'un cahier de recommandations de l'association pour un déploiement de l'éolien en mer plus respectueux de la biodiversité.

INTRODUCTION

Cette synthèse porte sur les principaux effets liés à l'exploitation de parcs éoliens en mer sur l'avifaune et les chiroptères. À partir d'une revue de la littérature scientifique et grise, incluant des études d'impact, elle présente les connaissances sur les impacts potentiels de ces infrastructures sur ces espèces. Ce document se compose de deux chapitres. Le premier concerne les effets auxquels sont exposés l'avifaune puis les chiroptères dans le compartiment aérien en phase d'exploitation des parcs éoliens en mer. Le second chapitre présente et discute les moyens potentiels d'atténuation de ces effets, ce afin de diminuer les impacts sur les populations.

Définition de l'éolien en mer

Nous entendons par « éolien en mer » les éoliennes fixées dans le fond marin (technologie éolienne posée) ou sur une base flottante (technologie éolien flottant) (1). Cette synthèse considère aussi des études ayant trait à des parcs éoliens côtiers, dont les éoliennes sont situées au-dessus de l'eau, comme sur un brise-lame, ainsi qu'à moins de 5 km des côtes. Ces parcs seront ici référencés comme des parcs éoliens « côtiers ». Les parcs éoliens qui sont appelés à être développés sur l'espace maritime français, ainsi que ceux déjà en activité, sont jusqu'à présent implantés au minimum à 10 km des côtes. En Europe, il existe quelques parcs éoliens en mer qui ont été construits très proche du littoral dans la bande des 3 milles marins, par exemple le parc de Zeebrugge en Belgique. Sont incluses dans notre analyse les études portant sur l'ensemble de ces parcs parce qu'elles offrent des éclairages sur les risques de l'éolien en mer au large, pour l'avifaune marine. Du fait de leur disposition particulière, les résultats ne sont pas toujours directement transposables à l'éolien en mer. On précisera donc systématiquement lorsque les études concernent des parcs éoliens côtiers et littoraux et non en mer.

Éléments de contexte sur le travail de la LPO sur le volet éolien/biodiversité

La LPO s'investit sur la thématique de l'éolien depuis 1995 et dispose d'un programme Energies Renouvelables et Biodiversité, en partenariat notamment avec l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'énergie (ADEME) depuis 2006¹. Dans ce cadre, une première synthèse de connaissances a été publiée en 2019 en collaboration avec l'Office national de la chasse et de la faune sauvage (ONFCS) sur les impacts de l'éolien terrestre sur la biodiversité (2).

La démarche de la LPO vise à accompagner les différents acteurs vers une meilleure prise en compte des enjeux de biodiversité dans le développement, la construction et l'exploitation des infrastructures renouvelables. La LPO, via son inscription dans le réseau BirdLife International, œuvre à transposer au contexte français les bonnes pratiques ou les enseignements tirés du développement de l'éolien en mer dans des pays voisins et qu'en définitive acteurs de la filière, acteurs publics et citoyens disposent du meilleur niveau

¹ Un site internet a été créé qui présente le programme Énergie et Biodiversité de la LPO et met à disposition des éléments de compréhension des enjeux et des bibliographies sur le sujet : <https://www.eolien-biodiversite.com/>.

d'information possible pour décider des modalités du développement de l'éolien sur le territoire national dans le respect de la biodiversité.

Le changement climatique et ses effets sur la faune volante : l'urgence de décarboner nos systèmes énergétiques

Le dérèglement climatique a d'ores et déjà des effets sur les écosystèmes marins et ceux-ci devraient s'accroître dans l'avenir. La conjonction de phénomènes, comme l'augmentation de la température de l'eau, la survenue plus fréquente de vagues de chaleur océaniques, la désoxygénation de l'eau en haute mer ou encore l'acidification des océans, constitue une menace de premier ordre pour la santé des milieux marins. Les oiseaux présents en mer et sur les zones côtières, qui sont des groupes d'oiseaux dont l'état de conservation est déjà préoccupant, risquent d'être particulièrement impactés. De fait, le changement climatique est d'ores et déjà une des principales menaces sur les populations d'oiseaux marins (3). Les effets prospectifs du changement climatique sur ces oiseaux sont majoritairement négatifs, avec par exemple en Atlantique Nord une vulnérabilité accrue pour des espèces comme le Macareux moine, et la Mouette tridactyle, et une probable détérioration de leur état de conservation à moyen terme (4). En France, les populations de Macareux moine sont déjà en déclin, avec seulement 110 individus recensés lors du recensement en 2020-2022 contre 240 lors du recensement de 1997-2001 (5). La disparition des derniers sites de nidification du fait du réchauffement climatique pourrait ainsi conduire à une multiplication d'extinctions locales.

La transformation du mix énergétique majoritairement issu du fossile aujourd'hui vers des énergies renouvelables (EnR) est l'un des principaux leviers de diminution des gaz à effet de serre responsables du changement climatique. À ce jour, l'Union Européenne a publié plusieurs feuilles de route (dernière en date le plan REPowerEU) et fixé des objectifs de réduction des émissions. Mis en œuvre, ces plans pourraient aboutir à une réduction des gaz à effet de serre (GES) de l'ordre de 57 à 58 % d'ici 2030 par rapport à 1990. Cependant, pour rester dans une trajectoire à 1,5° C à horizon 2100, les objectifs devraient être encore plus ambitieux, de l'ordre de 61 à 73 % de réduction (6). La LPO estime que la priorité doit être donnée à la sobriété et à l'efficacité énergétique et que les énergies fossiles résiduelles doivent, à terme, être remplacées par des énergies renouvelables, faiblement émettrices de GES et présentant des risques technologiques maîtrisés. Dans ce mix, l'éolien en mer a son rôle à jouer.

Etat des lieux des parcs en projet et de l'accélération du déploiement de l'éolien en mer en France

L'énergie éolienne en mer est une source d'énergie renouvelable qui est appelée à connaître un développement accéléré en France ces prochaines années et décennies. La Commission européenne a publié le 19 novembre 2020 sa stratégie de développement des énergies marines renouvelables. En 2022, la capacité installée d'éolien en mer est estimée dans l'UE-27 à 16,3 GW. La Commission européenne considère possible d'atteindre une capacité de 300 GW d'éolien en mer en 2050 (avec une première étape de 111 GW en 2030) (7).

À l'issue des premiers appels d'offre lancés entre 2012 et 2019, la mise en service de sept parcs éoliens en mer d'environ 500 MW chacun devrait aboutir d'ici 2026. Fin 2023, les parcs installés au large de, Saint-Nazaire, Saint-Brieuc et Fécamp sont partiellement connectés au réseau et fonctionnels quand ceux de Courseulles-sur-Mer, Dieppe-Le Tréport, Yeu-Noirmoutier et Dunkerque sont encore en phase de développement ou de construction. Les premières fermes

pilotes d'éolien flottant sont aussi développées en Méditerranée, et seront prochainement en exploitation. En 2023, la LOI n° 2023-175 du 10 mars 2023 relative à l'accélération de la production d'énergies renouvelables (loi APER) et la révision de la Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) actent le choix d'accélérer le déploiement de l'éolien en mer avec un objectif de 45 GW de puissance installée à horizon 2050, ce qui représente environ 50 parcs éoliens en mer et presque le double de la puissance installée en éolien terrestre en 2023 (25 GW). Un objectif de lancement d'appel d'offre pour 10 GW en 2025 est également affiché par l'Etat français.

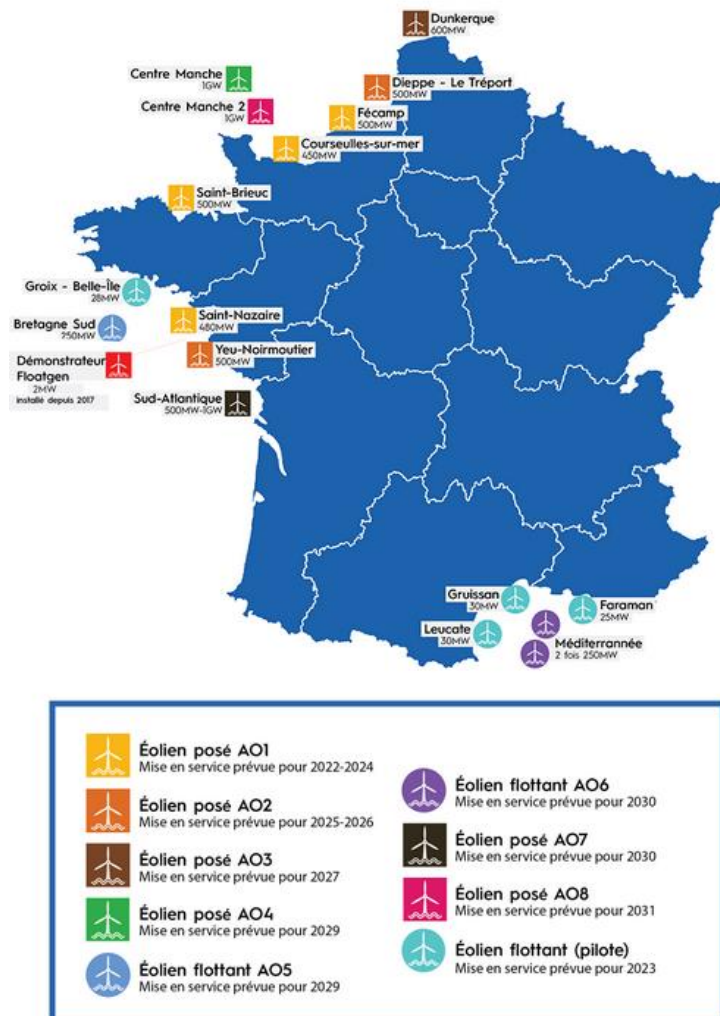


Figure 1 Cartographie des parcs éoliens en mer français actuels
 Source : <https://www.energiesdelamer.eu/2022/04/30/carte-des-emr/>

Impact et effets : Définir les notions

L'enjeu est de caractériser les effets de l'exploitation de parcs éoliens en mer sur la faune volante. Un **effet**, qui peut être positif, négatif ou neutre, produit un **impact** dès lors qu'il conduit à « une modification d'un paramètre ou d'une mesure importante de l'espèce ou du groupe concerné, telle qu'une baisse significative du nombre, de la densité ou d'un paramètre de population », comme le nombre de jeunes à l'envol (8). En d'autres termes, l'impact est l'effet d'un

projet sur les enjeux identifiés lors de l'état initial, en l'occurrence ici les enjeux de bon état écologique (9). Par exemple, l'effet « collision » est défini comme l'effet direct de la rencontre entre un individu et un obstacle, l'impact étant la mortalité associée à la collision ou aux suites de celle-ci par blessure grave. Le cumul de ces mortalités à l'échelle de chaque individu peut avoir des conséquences à l'échelle de la population et ainsi sur l'état de conservation de l'espèce. C'est ce que l'on traitera ici sous la notion d'impacts cumulés.

Connaissances scientifiques générales sur les types d'impacts de l'éolien en mer sur la faune volante

Les premiers parcs éoliens en mer ont été construits dans les années 1990 dans la mer du Nord et la mer Baltique. Les connaissances sur les effets de ces parcs éoliens sont donc relativement récentes et ont été pour partie produites dans le cadre des programmes de suivi de l'avifaune diligentés par ces parcs. Il est à noter que les éoliennes des premiers parcs étaient plus petites que celles actuellement installées en France. Celles-ci ont également été implantées en dehors du périmètre des aires marines protégées et dans des contextes écologiques différents. Cette littérature n'est donc pas directement transposable au cas français.

Les interactions avifaune-parcs éoliens en mer documentées dans la littérature sont multiples. Sans minimiser les impacts sous-marins, il a ici été fait le choix de se concentrer sur les principaux impacts au niveau du compartiment aérien. La construction d'infrastructures verticales en mer représente un obstacle inédit pour l'avifaune et les autres groupes d'espèces fréquentant la zone. L'iconographie suivante donne un aperçu des incidences génériques sur l'environnement généralement considérés, auxquelles il faut rajouter l'effet de « déplacement » sur le compartiment aérien.

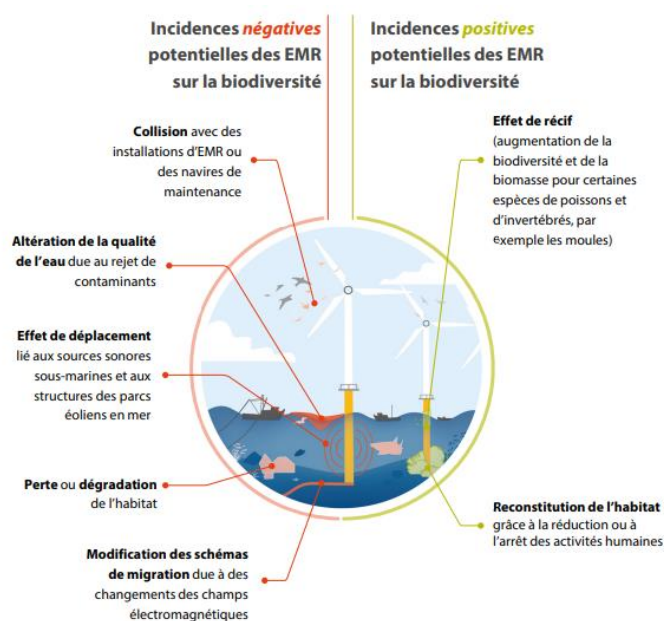


Figure 2 – Vue d'ensemble des incidences des EMR sur l'environnement. Source : Cour des Comptes Européennes sur la base d'une analyse bibliographique, 2023, p. 38

Note sur les incidences positives dans le contexte français : il n'existe pas de consensus scientifique sur la réalité du bénéfice apporté par l'effet récif au sein des parcs éoliens en mer. De

plus, dans le contexte du développement de l'éolien en mer en France, il est prévu que les zones restent majoritairement ouvertes aux pêcheries pendant la période d'exploitation des parcs, la question des reports d'activité et donc d'un possible « effet réserve » et/ou de reconstitution de l'habitat ne se pose pas dans les mêmes termes que dans d'autres pays.

Si la plupart des effets sur la faune volante se situent dans le compartiment aérien, d'autres effets liés au développement de l'éolien en mer sur l'avifaune ont été identifiés. Nous les mentionnons ici pour rappeler que cette **synthèse ne couvre pas l'intégralité des perturbations susceptibles d'avoir un impact sur la faune volante**. Sont mentionnés dans la littérature, notamment :

- Des **effets sur l'audition des oiseaux**, particulièrement lors des phases de construction des parcs. Au Royaume-Uni, une étude sur des Goélands marins a montré un déclin de leur succès alimentaire au moment de la construction du parc éolien en mer de Scroby Sands. L'hypothèse proposée est que les nuisances sonores qui affectent parfois de manière définitive l'audition des goélands sont un facteur explicatif (10). Lors de la phase de démantèlement, les nuisances sonores sont aussi susceptibles de causer des dérangements, mais peu d'études sont disponibles à ce sujet étant donné que la plupart des parcs en mer sont soit en projet, soit en service (11).
- Plusieurs travaux indiquent que les structures sous-marines des éoliennes ont des effets, en particulier **sur les oiseaux plongeurs** (12). Sur ce compartiment, des effets spécifiques à l'éolien flottant sont également à l'étude, et notamment les risques d'enchevêtrement secondaires dans les déchets emmêlés dans les lignes d'ancrage. Les effets indirects sur la chaîne alimentaire restent difficiles à caractériser.

Il ressort des études menées jusqu'ici que les principaux effets des parcs éoliens marins sur l'avifaune sont : **(i) liés aux collisions ; (ii) les effets d'attraction et de déplacement ; (iii) les effets barrière** (13). Ces trois types d'effets documentés par la littérature font l'objet de cette synthèse. Ces effets sont de nature différente : des effets directement responsables de mortalités additionnelles, principalement de collision avec les infrastructures aériennes ; et des effets entraînant une mortalité additionnelle indirecte ou des échecs reproducteurs, résultant des modifications d'habitats engendrées par les parcs éoliens (14).

Une notion importante dans la caractérisation des incidences du développement de l'éolien en mer sur la faune volante est celle des **impacts cumulés** (voir Ch1. O. Pour avoir une vision complète des risques posés par le développement de parcs éoliens en mer sur les oiseaux et les chiroptères, il convient de prendre en compte les effets cumulatifs sur le milieu marin, à la fois du développement des EMR (cumul spatial du fait de la multiplication des parcs, mais également cumul des différents effets collision, perte d'habitat et effet barrière) et de leurs interactions avec d'autres activités humaines en mer. Il est nécessaire d'adopter une approche intégrative pour pouvoir tirer des conclusions robustes sur les risques d'impact négatif que pose le développement de l'éolien en mer vis-à-vis des populations d'oiseaux et chiroptères.

CHAPITRE 1 - CARACTÉRISATION DES IMPACTS SUR L'AVIFAUNE ET LES CHIROPTERES DANS LE COMPARTIMENT AERIEN : MÉTHODES, ÉTAT DES CONNAISSANCES ET LIMITES

Partie 1 – Impacts sur les oiseaux marins et les oiseaux terrestres migrateurs

Principales familles d'oiseaux marins et d'oiseaux d'eau mentionnées dans cette synthèse

Familles	Espèces mentionnées dans cette synthèse
Sulidae	Fou de Bassan - <i>Morus bassanus</i>
Phalacrocoracidae	Grand Cormoran - <i>Phalacrocorax carbo</i>
Stercorariidae	Labbe parasite - <i>Stercorarius parasiticus</i> Grand Labbe - <i>Stercorarius skua</i>
Alcidae	Macareux moine - <i>Fratercula arctica</i> Pingouin torda - <i>Alca torda</i> Mergule nain - <i>Alle alle</i> Guillemot de Troil - <i>Uria aalge</i>
Procellariidae	Fulmar boréal - <i>Fulmarus glacialis glacialis</i> Puffin des Baléares - <i>Puffinus mauretanicus</i> Puffin yelkouan - <i>Puffinus yelkouan</i>
Sternidae	Sterne caugek - <i>Sterna sandvicensis</i> Sterne pierregarin - <i>Sterna hirundo</i>
Laridae	Mouette tridactyle - <i>Rissa tridactyla</i> Goéland argenté - <i>Larus argentatus</i> Goéland marin - <i>Larus marinus</i>
Podicipedidae	Grèbe huppé - <i>Podiceps cristatus</i>
Anatidae	Eider à duvet - <i>Somateria mollissima</i> Macreuse noire - <i>Melanitta nigra</i>

Le cycle biologique des oiseaux : quelques éléments définitionnels

Les espèces d'oiseaux marins sont des espèces **longévives**. Elles se caractérisent par un faible taux de reproduction et une maturité sexuelle tardive et ont donc une croissance démographique lente.

En France métropolitaine, le cycle annuel de la plupart des espèces d'oiseaux se compose des phases suivantes :

La **migration prénuptiale** (printemps), avant la nidification, a généralement lieu du Sud vers le Nord. La **nidification** correspond à la période de reproduction, et a lieu, selon les espèces, de mars à août. 98% des espèces d'oiseaux marins nichent en colonies sur le littoral (15). La **migration postnuptiale** (automne), qui fait suite à la nidification, est généralement orientée vers le Sud. **L'hivernage** concerne la période durant laquelle les oiseaux vont passer l'hiver au sein d'aires géographiques offrant des conditions météorologiques plus clémentes.

Les déplacements migratoires s'effectuent de jour comme de nuit, par des voies plus ou moins définies et qui peuvent varier selon les années et selon les espèces.

Pour les oiseaux marins, la recherche de nourriture en mer conditionne fortement le succès reproducteur des individus. Pour nourrir les poussins, les parents effectuent des trajets réguliers entre les sites d'alimentation en mer et les sites de reproduction pendant la période de nidification. Ces différents types de déplacements (migration saisonnière et trajets alimentaires) induisent des différences de sensibilité aux effets de l'éolien en mer selon la période de l'année.

A) Une mortalité directe : l'effet « collision »

Résumé

- L'effet collision est un effet avéré de l'éolien en mer sur l'avifaune qu'il est difficile de mesurer précisément.
- La modélisation prédictive des risques de collision est une méthodologie largement utilisée mais qui **présente plusieurs limites** et nécessite des données d'entrée précises et spécifiques au site étudié (parfois très difficiles à obtenir).
- L'ordre de grandeur de l'effet collision a une forte variabilité interspécifique et varie selon plusieurs paramètres, notamment liés à la localisation des parcs, au positionnement et au gabarit des éoliennes, ainsi qu'aux espèces présentes sur la zone à la saison.
- Ces modèles de risques de collision manquent aujourd'hui de base de validation. En l'absence de calibrage par des données factuelles de terrain, il convient d'être précautionneux dans l'interprétation et l'usage des résultats obtenus.
- Il est fondamental de réduire le risque de collision avec les éoliennes en mer pour limiter la mortalité sur les oiseaux marins nicheurs adultes, et il faut en priorité protéger cette survie adulte pour assurer la conservation des espèces.

Les collisions mortelles peuvent se produire de différentes manières : collision avec les superstructures stationnaires, les pales en rotation ou stationnaires, ou encore par blessure mortelle du fait d'une aspiration dans les vortex (tourbillons d'air) créés par la rotation des pales (16). Plusieurs défis méthodologiques rendent difficile le calcul de l'ampleur de cet effet et ce faisant de son impact sur les populations d'oiseaux. On présente ci-après les méthodologies utilisées pour caractériser l'effet collision ainsi que leurs limites. Enfin, on résume l'état des connaissances sur les impacts de cet effet collision sur les dynamiques des populations d'oiseaux.

i. MESURER L'EFFET « COLLISION »

Alors que cela est possible dans le cas de l'éolien terrestre, **compter les cadavres d'oiseaux** au pied des turbines s'avère impossible en mer. De rares études se sont basées sur une méthodologie d'observation directe, avec visite de la zone plusieurs fois par semaine à la recherche de cadavres et observation sur place des oiseaux en vol, comme en Allemagne (17), ou encore en Belgique mais dans une situation où les éoliennes étaient disposées sur un brise-lame

(18). Cette étude, comme d'autres sur l'éolien terrestre, utilise des facteurs de correction pour le pourcentage de cadavres prélevés par des charognards. Les auteurs de ces études concluent que dénombrer les carcasses d'oiseaux tombés en mer s'avère à la fois difficile et onéreux. Il arrive aussi que des observations opportunistes puissent amener à constater une mortalité liée aux collisions, mais sans jamais pouvoir permettre de la quantifier. Dans le cas du démonstrateur d'éolienne flottant au large de Saint Nazaire, douze carcasses d'oiseaux ont été retrouvées, pour la moitié dans le bac de flottaison² (9). De surcroît, les oiseaux pouvant être projetés à grande distance de l'éolienne, voire être soufflés et ainsi rendus introuvables, le comptage de cadavres ne peut donc permettre de dénombrer les collisions.

L'observation visuelle directe des collisions est limitée par les conditions météorologiques, ainsi que par la lumière du jour, les techniques de « *moon-watching* » offrant la possibilité d'observer les oiseaux la nuit étant généralement considérées comme très limitées (19,20). Ce type d'observation est par ailleurs limité par le facteur humain (pression d'observation nécessairement limitée dans le temps et l'espace). Des **techniques de détection automatisée** permettant de capter en temps réel les collisions d'oiseaux et chiroptères ont été testées, sur le modèle des dispositifs de surveillance post-construction commercialisés pour l'éolien terrestre (21). L'utilisation de caméras de vidéo-surveillance, de radars, ou de systèmes de détection thermique infra-rouge, installés directement sur les turbines, pourrait permettre d'acquérir de grandes masses de données et d'identifier de manière de plus en plus fiable les oiseaux à plusieurs kilomètres de distance (20,22-24). Ces technologies, globalement assez récentes et coûteuses, offrent la possibilité d'étendre le spectre d'observations possibles, notamment en conditions météorologiques défavorables à l'observation visuelle directe, ainsi que d'obtenir des données sur des plages continues (25). Mais la maritimisation de ces dispositifs présente des défis techniques du fait des conditions particulières en mer : le dépôt de sel et les tempêtes peuvent notamment engendrer une dégradation de la qualité des images. Enfin, l'enregistrement sonore pour détecter la vibration produite par l'impact de collision a aussi été testé (20). Cependant, détecter le son produit par une collision n'est pas entièrement fiable, de nombreux autres bruits pouvant interférer, et demande de développer des algorithmes très sophistiqués (26). Nous disposons à ce jour de trop peu de recul et de résultats sur ces technologies de détection des collisions pour être assurées qu'elles permettent d'identifier de manière fiable toutes les espèces d'oiseaux.

L'observation directe visuelle ou automatisée de l'effet collision souffre donc de limites importantes. Il n'est pas possible à ce jour de mesurer précisément la mortalité directe causée par l'interaction entre oiseaux et éolienne en mer.

ii. MODÉLISER LES RISQUES DE COLLISION

Le complément à l'observation directe de la mortalité liée aux collisions, qui est souvent présenté comme son alternative, est l'utilisation de modèles théoriques prédictifs d'estimation des risques de collision (CRM). Les modèles CRMs sont des modèles mathématiques qui permettent de prédire le nombre de collisions. Le plus utilisé est celui développé initialement par

² Si les causes de ces mortalités ne sont à ce jour pas élucidées, et si l'une d'elle peut être la mort naturelle d'oiseaux épuisés ayant trouvé refuge sur le flotteur, la survenue de collisions avec l'éolienne n'est pas à exclure.

Band en 2012 (27). Les résultats de ces modélisations sont utilisés dans le cadre des études d'impact environnementales et peuvent donc conditionner l'obtention d'une autorisation d'un projet d'exploitation de l'éolien en mer. Ainsi la robustesse de ces modèles de prédiction des risques de collision focalise l'attention des acteurs (28).

Les données d'entrée de ces modèles sont empiriques. Elles gagnent à être mesurées au niveau du site spécifique d'implantation du parc éolien pour estimer le plus fidèlement possible la situation sur le terrain. Ces données portent : **(1)** sur les caractéristiques du parc et des éoliennes, **(2)** sur le nombre et les espèces d'oiseaux fréquentant la zone, et **(3)** sur leurs caractéristiques et comportement de vol.

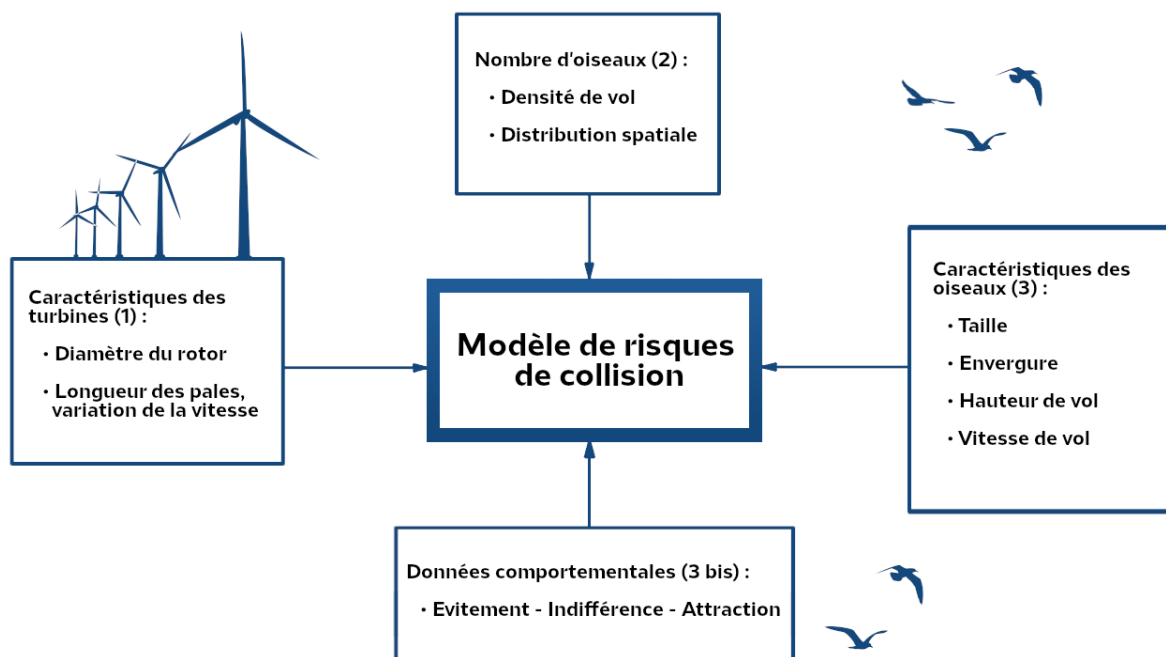


Figure 3 - Présentation des principales données d'entrée des modèles CRM

La probabilité qu'un oiseau entre en collision avec une éolienne dépend mécaniquement de paramètres liés au gabarit de l'éolienne **(1)**, c'est-à-dire de la hauteur entre le niveau de l'eau et le bas des pales et de la superficie de la zone balayée par le rotor. Peu de modèles considèrent les risques de collision avec les structures fixes.

Pour les données sur les caractéristiques des espèces **(2)**, on considère à la fois le nombre d'individus (par comptage de l'avifaune) et la fréquence de fréquentation de la zone du parc par rapport à l'effectif. Typiquement, on peut estimer le nombre d'oiseaux présents sur la zone par observations depuis un bateau ou en survolant la zone, en effectuant un comptage par transect (29).

Les données sur les paramètres de vol des oiseaux **(3)**, telles que la hauteur et la vitesse moyennes de vol, sont souvent des données génériques. Cependant, mesurer la hauteur de vol et la vitesse en vol des oiseaux sur chaque site permet d'obtenir des estimations plus robustes,

car ce sont des paramètres soumis à une grande variabilité. Collecter ces données demande un travail d'observation précis et chronophage, ce qui explique qu'il soit rarement effectué (30). La technologie radar, utilisée pour étudier l'intensité de vols d'oiseaux diurnes et nocturnes, peut permettre d'améliorer la précision des modèles CRM en collectant des données plus aisément et massivement que par observation visuelle directe. Aux Pays-Bas, l'installation d'un radar au sein du parc Egmond aan Zee a permis d'enregistrer en continu pendant trois ans le mouvement des oiseaux marins locaux et des oiseaux migrateurs, et ainsi de mieux caractériser la saisonnalité de leur intensité de vol à hauteur de pales (31). Une limitation est toutefois la difficulté à analyser les données enregistrées par temps de pluie (31) et en conditions météo difficiles, mais également l'impossibilité pour ces technologie à ce jour, de distinguer entre différentes espèces aux statuts et enjeux de conservation différents.

Si les premiers modèles de risque de collision considéraient que l'oiseau n'effectue aucune modification de trajectoire et que la probabilité d'être au mauvais endroit au mauvais moment était uniquement une question de positions de coordonnées dans l'espace, il est aujourd'hui admis que les oiseaux modifient leur trajectoire de vol à l'approche des parcs éoliens. Les modèles sont particulièrement sensibles aux données sur le comportement d'évitement des oiseaux (**3 bis de la Figure 3**), évitement qui peut s'effectuer sur un plan horizontal et vertical (32). Dans le cadre de l'étude sur l'évitement du projet *Offshore Renewables Joint Industry Programme* (ORJIP), il a été proposé de distinguer trois niveaux d'évitement (33) :

- Le **micro-évitement** correspond à une réponse de dernière minute de l'oiseau dans un périmètre de 10 m autour de l'éolienne. L'oiseau peut alors soit : (i) faire demi-tour avant de passer au niveau du rotor ; (ii) s'arrêter avant de traverser la zone balayée par les pales ; (iii) traverser en ajustant sa trajectoire de vol.
- Le **méso-évitement** désigne le comportement d'évitement des oiseaux à l'intérieur du parc éolien, volant à plus de 10 m des turbines. Le méso-évitement représente donc une redistribution spatiale des oiseaux à l'intérieur du parc éolien, avec une plus forte densité dans les couloirs entre les éoliennes.
- Le **macro-évitement** correspond à l'évitement avant l'entrée dans la zone du parc et se produit ainsi au-delà du périmètre du parc, entraînant une redistribution des oiseaux à l'intérieur et à l'extérieur du parc éolien. Les auteurs proposent de considérer le macro-évitement dans un périmètre allant jusqu'à 3 km à l'extérieur du parc éolien (33). En pratique, certaines espèces peuvent dévier leur trajectoire à plus de 3 km du parc, nous y revenons dans la partie sur « l'effet barrière ».

Deux autres situations sont possibles : l'oiseau ne modifie pas sa trajectoire de vol et parvient à passer sans heurts à travers la zone du rotor, ou bien il entre en collision avec la structure (33).

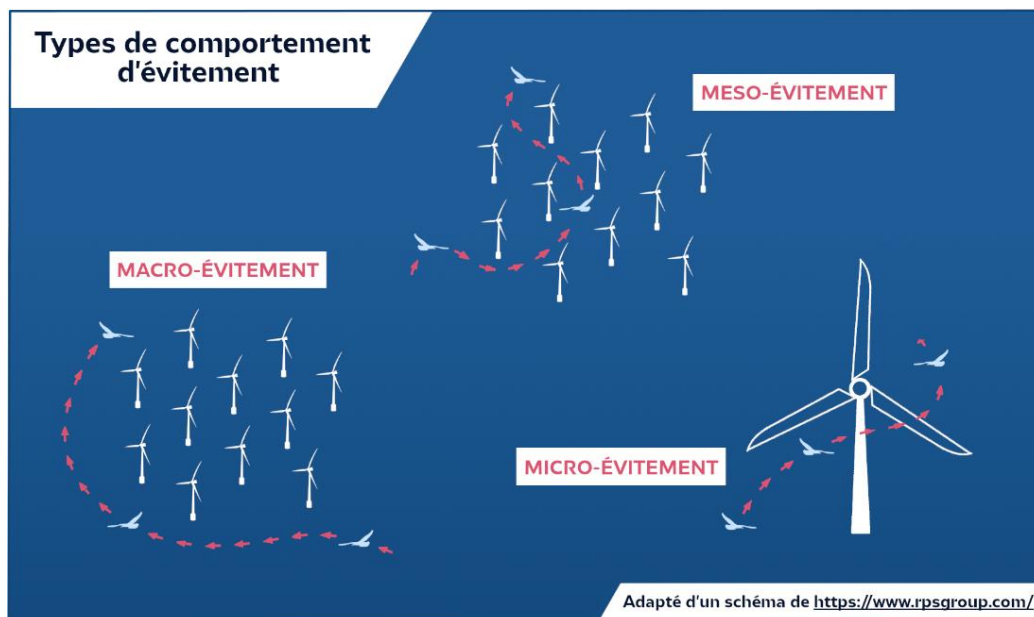


Figure 4 Illustration des types de comportement des oiseaux d'évitement des éoliennes

Les taux d'évitement empiriques (*Empirical Avoidance Rates* - EARs) calculés dans le cadre du projet *ORJIP* visent à corriger les paramètres d'entrée des modèles CRM pour que soient prises en compte les stratégies comportementales des différentes espèces d'oiseaux. Il y a une grande variabilité inter et intraspécifique dans la réponse et le comportement des oiseaux en présence d'un parc éolien en mer.

Pour améliorer ces modèles, on observe depuis quelques années une multiplication des études utilisant des données télémétriques. La technologie GPS et la pose de balises miniaturisées avec appareils enregistreurs communicants rendent possible la collecte de données sur des oiseaux de taille de plus en plus petite, la règle étant que le dispositif n'excède pas 3% de la masse de l'animal, afin qu'il n'influe pas de manière significative sur ses capacités de survie (34). Mais à ce jour, certaines espèces d'oiseaux marins de petite taille (de poids inférieur à 0,5 kg) qui peuvent être affectés par les parcs éoliens en mer, ne peuvent pas être équipés et suivis car les balises disponibles sur le marché ne sont pas assez miniaturisées (35).

La pose de capteurs télémétriques sur les oiseaux pour quantifier les caractéristiques de vol permet de dépasser certaines limites de l'observation par radar en décrivant au plus près leurs réactions comportementales en présence d'éoliennes (34). Une étude a mis en évidence que les données de hauteur de vol recueillies à l'aide de capteurs (GPS et pression barométrique) sur des fous de Bassan, peuvent différer fortement de celles mesurées par radar ou observation directe (36). La mesure empirique par télémétrie a ainsi permis de corriger des données d'entrée du CRM et de montrer que les fous de Bassan de la colonie de Bass Rock, en Ecosse, étaient douze fois plus exposés au risque de collision que précédemment envisagé (36). À cet égard, il manque à ce jour un cadre d'harmonisation des différentes méthodes de quantification de la hauteur de vol utilisées pour les rapports d'études d'impact environnemental, et ce alors qu'elles peuvent faire varier substantiellement les résultats (37).



© David Crawshaw - BTO

Photo 1 - Goéland brun avec balise GPS

La télémétrie a été utilisée pour étudier le comportement en mer des goélands bruns (*Larus fuscus*) (**Photo 1**) (34,38), des fous de Bassan (*Morus bassanus*) (39) ou encore des guillemots de Troïl (*Uria aalge*) (40). Ces études ont révélé que la saisonnalité des comportements en vol entraîne une différence de sensibilité au risque de collision selon la période. Ces travaux insistent sur l'importance d'utiliser des données empiriques sur les comportements des oiseaux dans les modèles CRMs qui fassent état de la variabilité temporelle de leur comportement en mer. L'étude de la saisonnalité de la vulnérabilité des fous de Bassan aux collisions avec les éoliennes, par suivi sur cinq saisons de reproduction d'une grande colonie écossaise est à ce titre particulièrement intéressante (39). En équipant au total plus de 150 oiseaux de capteurs GPS, les chercheurs ont mis en évidence que les individus des deux sexes modifient leur comportement alimentaire en période de nourrissage des poussins par rapport à la période pré-éclosion. Ils parcourent de moins grandes distances et passent proportionnellement plus de temps au sein des zones de parcs en mer qui se situent à proximité de leur colonie. Les fous de Bassan ont ainsi un risque huit fois plus grand d'entrer en collision avec les turbines à cette période de l'année (39). Le facteur sexe entre aussi en compte, les femelles passant davantage de temps que les mâles en mer, elles sont exposées à un risque de collision trois fois plus élevé que les mâles (39).

Concernant l'éolien flottant, les spécificités des risques de collision avec cette technologie nouvelle sont encore mal connues (41). Plusieurs paramètres pourraient influencer les résultats des modèles CRMs. Les parcs d'éolien flottant étant situés plus loin des côtes, où le vent est plus fort, les oiseaux pélagiques qui évoluent dans cette zone sont susceptibles d'avoir un comportement en vol plus à risque du fait qu'ils effectuent un vol plané (42). De plus, l'éolien flottant n'ayant pas de fondations fixes, la flottaison de la turbine implique que la surface balayée par le rotor change selon un double mouvement vertical et horizontal (41). Ainsi, aux multiples difficultés à modéliser les risques de collision pour l'éolien en mer, viennent s'ajouter de nouvelles inconnues avec le développement de l'éolien flottant.

Que peut-on dire des ordres de grandeur de cet effet collision dont on a vu qu'il est modélisé plus que mesuré ?

iii. ORDRES DE GRANDEURS DE LA MORTALITE AVIAIRE ET INCERTITUDES

Un indicateur fréquemment utilisé pour caractériser et comparer les résultats des études sur les parcs éoliens terrestres est le nombre d'individus tués par turbine et par an (13,43). Il est aussi possible d'exprimer le nombre de collision par GWh. On observe une forte variation entre les parcs éoliens terrestres. Une étude compilant des données de mortalité avérée et estimée avec des modèles indique qu'il y a entre 0 et 50 oiseaux tués par turbine annuellement (42), ainsi qu'une variation interannuelle et intra-parc, selon la localisation des turbines. Peu de mesures sont disponibles sur les parcs éoliens en mer mais les quelques études qui proposent un taux de mortalité annuelle par turbine avancent aussi une forte variabilité. Dans le cas du parc belge terrestre côtier de Zeebrugge si le taux moyen par turbine s'est élevé à 20 oiseaux morts par an, il se trouve que quatre des vingt-cinq turbines ont été responsables de 75% de la mortalité du parc, et ce du fait de leur situation au centre du couloir de circulation entre une colonie de Sternes pierregarin (*Sterna hirundo*) et leur zone d'alimentation (18). Dans ce cas, la mortalité annuelle par éolienne était de 6,7 sternes, auxquelles s'ajoutent un nombre important de goélands (18). Le parc éolien en mer néerlandais d'Egmond aan Zee a, selon les scientifiques chargés de son suivi, un taux de collision avérée de 16 oiseaux par turbine et par an, majoritairement des goélands et des passereaux (44). La variabilité entre les parcs peut s'expliquer par des facteurs spatiaux, de localisation du parc par rapport aux couloirs de migration des oiseaux, ainsi que par les dimensions des turbines qui tendent à augmenter (45). Le choix de la zone d'implantation est donc crucial et il convient d'éviter les zones fonctionnelles utilisées pour l'alimentation et les zones où les oiseaux migrateurs se concentrent : au bout des péninsules, en plein couloir de migration par exemple (16).

S'il est parfois avancé que le risque de collision en mer serait moins important que sur terre au motif qu'en mer on dispose d'une plus grande latitude pour adapter l'orientation des alignements d'éoliennes par rapport aux trajectoires de migration (16), ou que les obstacles verticaux en mer étant peu habituels pour les oiseaux, ils sont davantage susceptibles de les repérer que sur terre (19), il convient d'être prudent. Plusieurs faisceaux d'indices laissent à penser que, du fait des conditions météorologiques en mer, des pics de mortalité par collision peuvent survenir lors d'évènements extrêmes. Par exemple, dans un cas d'étude à Helgoland en Allemagne, de nombreuses carcasses ont été trouvées sur une plateforme de recherche en mer à la suite de nuits aux conditions météorologiques défavorables (tempête). Le balisage lumineux des structures peut être un facteur d'attraction pour de nombreux oiseaux terrestres en mer, en particulier les passereaux qui migrent la nuit (17,46). Associée à une visibilité réduite pour les oiseaux, ces phénomènes peuvent être particulièrement mortifères. Par ailleurs, aucune méthode d'observation directe ne suffit à être assuré d'observer ces « *mass collision events* » de fréquence indéterminée, qui pourraient s'accroître avec l'augmentation du nombre et de la violence des tempêtes en mer du fait du changement climatique (47). Ces épisodes amènent à considérer la mortalité par collision des oiseaux comme pouvant menacer la viabilité de la population, pour des espèces sensibles à l'éolien en mer.

Par ailleurs, lorsque la mortalité liée aux collisions est estimée par modélisation, le taux d'évitement utilisé peut faire considérablement varier le résultat obtenu. Par exemple, les taux d'évitement empiriques calculés dans le cadre d'ORJIP, qui combinent les trois échelles (micro,

méso, macro) de modification des trajectoires de vol, sont de l'ordre de 0,98 pour les espèces de grands goélands. Une autre synthèse sur l'état des connaissances sur les risques de collision et les comportements d'évitement des oiseaux marins, propose d'augmenter le taux général d'évitement des oiseaux à 0,99, avançant que les études portant sur les comportements d'évitement des Fou de Bassan, Goéland brun, Goéland argenté (*Larus argentatus*), Goéland marin (*Larus marinus*), Mouette tridactyle (*Rissa tridactyla*) concordent à dire que leur taux d'évitement est très élevé (13). Cette modification fait varier du simple au double la mortalité aviaire projetée (13). Il y a donc une grande marge d'incertitude qui rend difficile la comparaison entre parcs. Il importe également de mesurer les taux d'évitement par espèce.

De plus, les modèles CRM, même avec des données d'entrée contextuelles, restent une simplification de la réalité et ont plusieurs angles morts. Plusieurs hypothèses sont linéaires dans ces modèles, notamment le fait que la probabilité de collision d'un oiseau est constante quel que soit le nombre d'oiseaux qui volent autour de lui (28). Enfin, d'autres paramètres, jusqu'ici peu considérés, sont susceptibles d'accroître la vulnérabilité d'espèces à la collision. Mentionnons le fait que les oiseaux qui plongent pour se nourrir (sternes, fous, etc.) et volent relativement haut au-dessus de la surface de l'eau peuvent être distraits visuellement en se concentrant sur la recherche de proies sous la surface, par rapport aux oiseaux qui volent au ras de l'eau, et avoir un risque de collision avec les structures des éoliennes plus important que ce que leurs seules caractéristiques de vol permettent d'estimer (16).

Les connaissances sur le comportement des oiseaux marins et migrateurs en mer sont encore parcellaires. Si les études utilisant la modélisation tendent à trouver un taux de collision relativement faible pour les espèces longévives de grande et moyenne tailles grâce à un fort taux d'évitement à toutes échelles, la connaissance reste moins fournie pour les oiseaux de petite taille (16). La mortalité causée par les turbulences ou les barotraumatismes n'est pas renseignée chez les oiseaux marins dans la littérature actuelle mais les puissants vortex pourraient entraîner des blessures internes chez les oiseaux, causant à moyen terme leur mort, ce qui pourrait alourdir le bilan. Les taux d'évitement et notamment de micro-évitement étant encore très difficiles à mesurer, ils pourraient par ailleurs pour certaines espèces être plus faible que 0.98/0.99, ce qui aurait des conséquences fortes sur l'estimation des mortalités. Il manque enfin des bases de validation de ces modèles CRMs pour l'éolien en mer, du fait des difficultés à estimer empiriquement le nombre de collision sur site. En l'absence de calibration par des données factuelles de terrain, il convient d'être très précautionneux dans l'interprétation et l'usage des résultats obtenus (48).

iv. ETAT DE LA RECHERCHE SUR LES IMPACTS DEMOGRAPHIQUES DE L'EFFET COLLISION

Les résultats des modèles CRMs peuvent être utilisés pour prédire les conséquences des risques de collision sur l'état des populations d'oiseaux. En France, un outil de quantification de l'impact démographique lié aux collisions, EolPop, a été développé par le CRNS dans le cadre d'un programme de recherche sur l'éolien terrestre³. Des données d'entrée additionnelles sont alors utilisées : des données populationnelles ainsi que sur le type d'habitat et le statut de conservation. Différentes approches de calcul existent, de la simple soustraction de la mortalité

³ Le programme « Réduction de la Mortalité Aviaire dans les Parcs Éoliens en exploitation » (MAPE) Voir l'outil EolPop : <https://shiny.cefe.cnrs.fr/eolpop/>

estimée liée aux collisions, à des modèles plus sophistiqués. Par exemple, certains modèles prennent en considération le *potential biological removal* (PBR), c'est-à-dire le niveau de mortalité additionnelle maximale que peut supporter chaque année une population d'oiseaux au regard du taux de mortalité naturelle (28). Aucune méthodologie de calcul ne fait consensus (du fait des diverses hypothèses prises concernant la tendance naturelle d'évolution des populations). Les résultats de ces modélisations ont vocation à informer les décideurs et industriels quant aux impacts des effets de collision sur la viabilité des populations d'oiseaux. Pour une meilleure représentativité des impacts totaux, ces modèles devraient également prendre en compte les effets de dérangement et de déplacement (voir B)iv). Néanmoins passer de la caractérisation de ces effets à la quantification de leurs impacts sur les populations présente des défis méthodologiques importants et s'avère ainsi difficile (28,49).

L'impact démographique de la mortalité additionnelle par collision liée à un parc éolien est souvent jugé négligeable mais il peut parfois être préoccupant, en particulier pour les espèces longévives qui sont en mauvais état de conservation (43). Dans certains cas, la mortalité par collision pourrait être forte, touchant plus d'1% de la population régionale reproductrice. Par exemple, un modèle CRM sur les fous de Bassan de la colonie de Bass Rock⁴ prévoit durant la période de nourrissage une mortalité par collision de 1500 individus par an, entraînant des impacts potentiellement significatifs sur la population (36). La modélisation des dynamiques de population de 27 des 28 espèces d'oiseaux marins nicheurs présentes en France métropolitaine, révèle que le principal levier pour leur conservation consiste en des actions favorisant la survie adulte (dont la réduction du risque de collision avec les éoliennes en mer) (50). La mortalité accidentelle additionnelle à la mortalité naturelle est donc susceptible d'avoir un coût significatif sur les dynamiques de ces populations d'espèces longévives (51). Ainsi, l'impact démographique de l'effet collision seul doit déjà nous alerter sur les potentiels impacts négatifs à long terme sur les espèces d'oiseaux marins.



Photo 2 – Puffins et Goélands en vol.

⁴ Les scientifiques ont calculé grâce à des données télémétriques que les parcs éoliens en mer couvrent environ 2% de la zone d'alimentation des fous de Bassan de cette colonie.

B) Effets de dérangement de l'avifaune

Résumé :

- En fonction des espèces, les oiseaux réagissent différemment aux parcs éoliens en mer. Les cormorans sont fortement attirés dans la zone du parc éolien, alors que les plongeurs évitent massivement de s'en approcher.
- L'implantation de parcs éoliens peut être à l'origine des modifications des trajectoires de vol, entraînant alors une perte d'habitat fonctionnel pour les oiseaux marins. Par exemple, l'activité des plongeurs peut baisser sur une superficie importante, jusqu'à 16 km autour des parcs.
- L'effet barrière engendre une modification des trajectoires de vols d'oiseaux marins ou terrestres pour éviter la zone du parc. La quantification de cet effet est complexe. Pour les espèces effectuant des allers-retours fréquents en mer, comme les sternes, le contournement régulier de cet obstacle pourrait réduire leur succès reproducteur et affecter leur survie.
- Les connaissances sur ces effets sont aujourd'hui limitées, ne permettant pas de connaître leur ampleur réelle et d'en inférer les impacts démographiques. Il apparaît cependant que ces effets ont probablement des impacts sur les taux de survie des adultes et des poussins.
- Il importe de collecter des données in situ pour obtenir des estimations robustes de ces effets.

Nous l'avons vu, pour caractériser l'effet collision, il faut prendre en compte le comportement de l'avifaune. En réalité, l'effet collision est à replacer dans la gamme d'interactions avifaune-parc éolien, et n'en est qu'une expression (bien que la plus spectaculaire). La présence d'obstacles verticaux dans le compartiment aérien suscite des réactions très variées chez les oiseaux, et engendre des effets de dérangement d'intensité variable. Dans cette partie, sont présentées les connaissances sur deux effets négatifs liés aux modifications de l'usage de l'espace par les oiseaux.

i. DES REACTIONS COMPORTEMENTALES CONTRASTEES: PHENOMENES D'ATTRACTION ET D'INDIFFERENCE

Les parcs éoliens en mer peuvent susciter un effet d'attraction, d'indifférence ou au contraire de répulsion/évitement chez les oiseaux. Il faut disposer d'un point de comparaison pour qualifier les changements de comportement des oiseaux en présence d'un parc éolien marin. Par exemple, si, au Danemark les macreuses noires (*Melanitta nigra*) arrivées après le début de l'exploitation du parc Horn Rev 1, ont augmenté leur activité au sein du parc sur quelques années (29), cette étude a une charge de preuve faible. En effet, en l'absence de base de comparaison avec une situation de répartition des oiseaux antérieure à la construction du parc, il est difficile de conclure quant à la réalité d'un phénomène d'attraction. Une synthèse des études portant sur le comportement d'attraction ou d'évitement des parcs de 33 espèces d'oiseaux marins a permis de montrer que les réponses des différentes espèces d'oiseaux sont globalement

cohérentes entre les 20 parcs éoliens en mer étudiés, tous situés en Europe (52). Ainsi, des tendances générales se dégagent d'études qui n'ont pas toujours la même robustesse méthodologique et confirment l'existence d'une forte variabilité comportementale entre les espèces et entre les individus d'une même espèce. Les réactions des espèces peuvent être divisées en cinq classes : évitement fort, évitement faible, absence d'effet du parc éolien, attraction faible et attraction forte (52).

L'attraction n'est pas en soit un effet négatif mais peut engendrer des risques accrus de collision pour certaines espèces. Comprendre les mécanismes d'attraction est une étape nécessaire pour parvenir à les atténuer, ce qui peut s'avérer être un levier important pour diminuer les risques de collision. L'éclairage peut être un facteur d'attraction important pour les oiseaux, en particulier la nuit. Des recherches ont été menées très tôt sur différentes activités anthropiques en mer pour mieux comprendre la photo-attraction, phénomène bien renseigné. Les signaux lumineux d'avertissement destinés aux avions et bateaux peuvent désorienter les oiseaux, en particulier lorsque les conditions météorologiques sont médiocres (25).

La plupart des études analysées, qui concernent principalement des parcs proches de la côte, soulignent que l'attraction des cormorans est très forte (52). En mer du Nord, les grands cormorans (53) augmentent leur activité au sein du périmètre du parc. Dans ce cas, l'attraction sur la zone, qui constitue parfois une nouvelle zone d'alimentation, peut s'expliquer par le fait que ces oiseaux utilisent les superstructures des éoliennes comme perchoirs pour repérer leurs proies et comme reposoirs pour se sécher entre deux chasses. L'effet d'attraction pourrait aussi, dans certains cas, s'expliquer par un « effet réserve » (54). Dans plusieurs pays de la mer Baltique, la limitation des activités de pêche au sein des parcs éoliens peut favoriser une concentration plus grande de poissons et représenter un effet d'aubaine pour les oiseaux.

Certaines espèces ne modifient pas leurs comportements aux abords des parcs éoliens. Les mouettes tridactyles, sternes pierregarins, sternes arctiques (*Sterna paradisaea*) et eiders à duvet (*Somateria mollissima*) y sont globalement indifférents, ne modifiant qu'à la marge leur fréquentation de la zone exploitée (52). Mais pour de nombreuses autres espèces, en particulier d'alcidés et de sulidés, la construction du parc éolien en mer entraîne la perte d'une zone d'habitat ou d'un couloir de circulation.

ii. L'EFFET « DEPLACEMENT » ET LA PERTE D'HABITAT FONCTIONNEL

Lorsqu'à l'inverse d'un phénomène d'attraction, il y a évitement, et particulièrement un comportement de macro-évitement du parc, on observe une réduction partielle voire totale de l'activité des oiseaux sur la zone du parc. L'effet « **déplacement** » des oiseaux est l'influence de la présence du parc éolien sur la répartition des oiseaux en mer. Cet effet engendre une perte de zones fonctionnelles d'alimentation mais aussi de superficie de zones de repos ou de stationnement pour les espèces qui se posent en mer.

Pour parler de déplacement, il faut que l'évitement partiel ou total d'un parc éolien en mer soit observé alors que la zone était fréquentée par les oiseaux avant construction (25). Pour modéliser et quantifier l'ampleur de cet effet, deux méthodologies existent.

On peut soit mener des études d'impact en comparant directement la situation avant *versus* après l'installation du parc en comparant également la même évolution sur une zone témoin (zone aux caractéristiques comparables). Ce plan d'échantillonnage s'appelle le Before-After Control-Impact (BACI) (**Figure 5**) (55). Typiquement, la comparaison est néanmoins souvent réalisée seulement à partir d'observations depuis des bateaux naviguant sur la zone du parc et une à deux zones témoins uniquement à partir de la date de construction du parc car il manque de données comparables collectées antérieurement à cette date.

Alternativement, on peut mener des études avec approche par gradient, souvent menées avec comparaison avant/après (BAG, Before-After Gradient), et qui permettent de représenter le gradient de distribution des oiseaux autour de la zone de parc de manière continue, c'est-à-dire la densité d'oiseaux à n distance du parc éolien relativement à celle à l'intérieur du parc. Cette approche nécessite de collecter des données sur des zones plus étendues autour des parcs que la méthodologie BACI, mais semble aussi plus robuste pour quantifier l'ampleur géographique de cet effet de déplacement et donc la superficie d'habitat perdue (55,56).

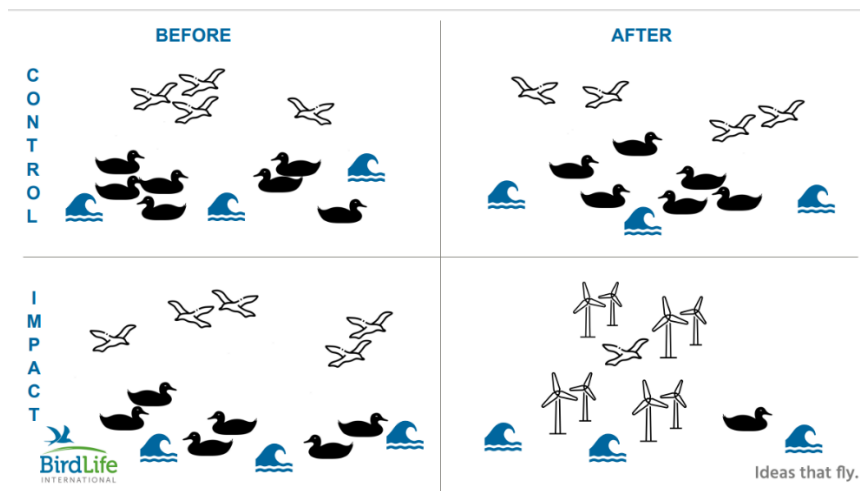


Figure 5 Présentation de la méthode BACI, schéma de BirdLife International.

Ces modèles, BACI ou BAG, nécessitent de collecter des informations sur la distribution spatiale en mer des oiseaux sur plusieurs périodes et une zone géographique étendue. Une revue des études scientifiques ayant trait au déplacement, toutes espèces confondues, révèle que 44% des études effectuées sur les parcs éoliens en mer concluent à l'existence d'un effet négatif de perte d'habitat des oiseaux, contre 15% qui concluent à un effet d'attraction dans la zone des parcs⁵ (57). L'effet de déplacement dépend de l'espèce d'oiseau mais aussi de caractéristiques individuelles telles que l'âge de l'oiseau, son sexe, ainsi que des caractéristiques du parc. Autant que possible, il conviendrait de compléter les observations sur bateau ou par avion qui n'offrent que des preuves indirectes de l'effet de déplacement, par de la télémétrie et des données radars (58). Par ailleurs pour procéder à une analyse à large échelle et une analyse des impacts cumulés,

⁵ Pour obtenir ces résultats, plus de la moitié de ces études utilisent les techniques traditionnelles de comptage de l'avifaune (transects, points d'observation), quand respectivement 20% et 6% utilisent des technologies de télémétrie GPS et radar.

il est urgent de formuler et appliquer des protocoles de suivi standardisés et harmonisés entre les parcs, pour pouvoir disposer de données de même nature et donc comparables entre elles.

De nombreuses espèces d'oiseaux marins modifient leur comportement en mer et évitent la zone des parcs éoliens en mer. C'est le cas par exemple des plongeurs catmarins (*Gavia stellata*), plongeurs arctiques (*Gavia arctica*) et des grèbes huppés (*Podiceps cristatus*), tandis que des espèces comme le Guillemot de Troil et le Pingouin torda (*Alca torda*), diminuent leur fréquentation de la zone mais sont toutefois observés en déplacement au sein des parcs (52).

L'évitement presque total des parcs éoliens marins par les plongeurs est amplement documenté. Une étude appliquant la méthodologie par gradient, avec des données obtenues par comptage sur bateau réalisée autour du parc allemand d'Alpha Ventus révèle que l'abondance de plongeurs a été réduite de 90% à l'intérieur par rapport à l'extérieur du parc (54). Mobilisant le suivi télémétrique de plongeurs catmarins, combiné à des données obtenues par comptages aériens, une seconde étude a corroboré ce résultat d'un effet de déplacement allant jusqu'à une quinzaine de km du parc (59). D'autres études ont mesuré que le déplacement des plongeurs est significatif sur un périmètre allant jusqu'à 16 km autour d'un parc (60). L'étendue spatiale de perte d'habitat fonctionnelle est donc significative pour les plongeurs.

Les résultats concernant les espèces de goélands sont moins consensuels. En Belgique, la distribution spatiale des goélands bruns avant et après la construction du parc de North Wind, a été étudiée grâce à un suivi télémétrique, puis analysée suivant la méthode BACI. Les goélands bruns évitent l'intérieur du parc pour privilégier son immédiate proximité, ce qui pourrait en partie s'expliquer par le déport des navires de pêche qui sont interdits dans la zone du parc (61). Mais une autre étude sur le parc allemand d'Alpha Ventus a conclu que les espèces de goélands n'évitent pas la zone du parc, et formule l'hypothèse qu'un « effet réserve » d'augmentation du stock de poissons et du benthos sur la zone rentrerait en compte (54). L'approche par gradient géographique a aussi été utilisée pour mesurer l'hétérogénéité spatiale de la distribution du Goéland brun dans la zone même du parc. Les données obtenues par suivi télémétrique ont montré qu'ils évitent le centre du parc et que certains se posent parfois sur les turbines sur les côtés du parc (38). On comprend dès lors que la variabilité des comportements de différentes espèces, comme les Goélands et les Plongeurs, implique d'effectuer des compromis entre le fait de privilégier un espacement des turbines, qui permet d'avoir des couloirs de circulation pour les espèces pratiquant un méso-évitement, et réduire la superficie totale du parc, qui pour des espèces comme les Plongeurs représente une superficie perdue en habitat fonctionnel.

Comme pour l'effet collision, la saisonnalité du comportement en mer est aussi à prendre en compte pour caractériser l'effet de déplacement. En exploitant une base de données de suivi télémétrique, une étude a comparé la distribution spatiale de deux espèces selon la saisonnalité (pendant et hors de la période de nourrissage) (40). Les guillemots réduisent fortement leur fréquentation de la zone après construction du parc, mais moins pendant la période de nourrissage des poussins (44%) que lors de la période pré-nuptiale (63%), ce qui est interprété comme lié au besoin d'effectuer des trajets plus courts et proches de la colonie à cette première période. La réduction d'activité des mouettes tridactyles est moins importante, mais

tout de même significative, même pendant la période de nourrissage avec une réduction de 45% de leur densité dans la zone du parc à cette phase (62). Ainsi, l'effet de déplacement a une amplitude qui varie selon la phase du cycle biologique des oiseaux.

Les mécanismes sous-jacents à cet effet déplacement ont aussi été étudiés. Il a été démontré que le comportement d'évitement de la zone du parc éolien en mer s'explique non par la seule présence des éoliennes mais aussi en partie par le mouvement des pales. En effet, il a été observé grâce à un radar que, lorsque les turbines sont mises à l'arrêt, le flux d'oiseaux en vol passant à travers la zone peut doubler voire tripler par rapport à lorsqu'elles sont en rotation (19). Utilisant un suivi télémétrique de 12 Guillemots de Troïl pendant la période d'élevage des poussins, une étude a montré un pourcentage d'activité d'alimentation perdue sur la zone du parc de 63%. Lorsque les pales étaient en rotation, ce taux d'évitement augmentait jusqu'à 75 % (40). Toutefois, certaines espèces, comme les goélands, ne réagissent pas à l'activité des turbines, et d'autres facteurs semblent donc entrer en compte, comme l'activité des bateaux de pêche dans la zone environnante (52).

Malgré la relative augmentation du nombre d'études portant sur les modifications d'activité de différentes espèces en présence de parcs éoliens en mer, plusieurs tenants de cet effet de déplacement demeurent mal connus. En particulier, des études à plus long terme et avec des protocoles adaptés de type BACI/BAG permettraient de comprendre la pérennité de ces effets. En Belgique, le programme de suivi du déplacement des oiseaux a permis d'observer ponctuellement sur des parcs en activité depuis plusieurs années une importante activité de fous de Bassan, pingouins torda et guillemots de Troïl au sein de la zone du parc éolien (61). Cependant, on dispose à ce jour de trop peu de recul pour pouvoir conclure quant à un phénomène de tolérance voire d'habituation progressive de ces oiseaux (60,61).



Photo 3 - Plongeon catmarin, espèce particulièrement sujette à l'effet déplacement

iii. MODIFICATION DES TRAJECTOIRES DE VOL : L'EFFET « BARRIERE »

L'effet « barrière » des parcs éoliens désigne l'effet de modification des trajectoires de vol en présence d'un parc éolien. Il s'agit d'évaluer l'influence de la présence du parc sur les oiseaux en vol, en migration ou dans le cadre de leurs déplacements locaux, et l'impact qu'il a en termes de consommation d'énergie supplémentaire déployée pour contourner le parc. Cet « effet barrière » peut affecter les oiseaux migrateurs terrestres et les oiseaux marins. Il se distingue de

l'effet déplacement en ce qu'il concerne aussi les oiseaux qui, avant la construction du parc, n'utilisaient pas forcément la zone pour se nourrir ou se poser. L'effet barrière est presque toujours négatif : il implique une augmentation du coût énergétique du vol, de la durée du vol, une augmentation des besoins énergétiques de l'oiseau et donc des conséquences sur son état de santé, voire sur sa survie (58). Cet allongement des durées de vol a également pour conséquence une diminution du temps d'alimentation et du temps de repos.

Les premières études sur cet effet ont utilisé une méthode de calcul simple : il s'agissait d'estimer la distance additionnelle engendrée par la déviation de la trajectoire à l'approche du parc, et de la rapporter à la longueur du trajet total. Dans une étude pilote sur les eiders à duvet évitant un parc éolien au large du Danemark lors de leur trajet migratoire entre la Scandinavie et le sud de la mer du Nord (63), la distance additionnelle calculée était de l'ordre de 500 m, ce qui, ramené au trajet total de 1400 km était considéré comme engendrant un coût énergétique additionnel négligeable.

Depuis, il est admis que la modélisation de cet effet est plus complexe et doit faire état de différences intraspécifiques, mais également prendre en compte sa dimension cumulative. Une première tentative de modélisation de l'impact de l'effet barrière en termes de coût énergétique a été effectuée pour plusieurs espèces d'oiseaux marins. Au niveau des caractéristiques morphologiques, les oiseaux à forte charge alaire, comme les cormorans, subissent le coût énergétique le plus élevé (64). Cependant, rapporté au comportement en mer, l'effet barrière est le plus important pour les oiseaux qui font de nombreux allers-retours en mer.



Photo 4 Sterne pierregarin - une espèce d'oiseau marin sensible à l'effet barrière

Cela est particulièrement vrai pour les Sternes pierregarin qui en font en moyenne 12 par jour, et voient leurs trajets quotidiens totaux substantiellement allongés, en particulier pendant la saison de nourrissage (64). Lorsque le coût additionnel est rapporté à la limite physique, le coût énergétique marginal est le plus important pour la Mouette tridactyle et le Macareux moine : l'effet barrière peut alors être une source de détérioration de leur état de santé (64).

Récemment, une technologie de caméra thermique 3D permettant de reconstituer et d'étudier les trajectoires tridimensionnelles de vol des oiseaux à proximité des parcs éoliens et ainsi de mieux modéliser le phénomène de macro-évitement, a été développée et testée sur des espèces de goélands, sternes et chiroptères (24). Cette technologie permet de caractériser l'activité de vol de l'avifaune en quantifiant à la fois leur fréquence de passage dans la zone, la hauteur et vitesse de vol et ainsi leur taux d'évitement de la zone balayée par le rotor. À l'avenir, on peut s'attendre à ce que les radars thermiques permettent de caractériser l'effet barrière de manière plus précise, en particulier pour les trajets nocturnes.

Il y a peu d'études portant sur les risques de collision et l'effet barrière des parcs éoliens en mer sur les espèces d'oiseaux migrateurs terrestres. L'existence d'un effet barrière pour dix espèces migratrices de rapaces en mer Baltique a été démontrée (65). Au Danemark, les rapaces diurnes font la plupart du temps demi-tour lorsqu'ils rencontrent les premières turbines pour retourner proche de la côte et évitent massivement le parc éolien en mer Anholt. Dans l'étude danoise de suivi post construction du parc de Anholt, les réponses d'évitement total les plus élevées ont été observées pour le Faucon crécerelle (86%) et le Milan royal (81%), suivis par la Buse variable (74%). Environ $\frac{3}{4}$ des oiseaux présentant un macro-évitement ont quitté le parc dans une direction indiquant qu'ils retournaient sur le continent, situé à une vingtaine de kilomètres (66).

La télémétrie permet depuis peu d'obtenir des données jusqu'alors inaccessibles sur le tracé des routes migratoires d'oiseaux qui traversent l'espace maritime aérien (34). Ont été étudiées à deux échelles⁶, à partir de données sur les trajets migratoires internationaux de Courlis cendré (*Numenius arquata*), les modifications à la fois horizontales et verticales, lorsqu'ils s'approchent ou traversent les parcs éoliens en mer du Nord et mer Baltique (67). L'étude révèle que 31% des oiseaux ont traversé au moins un parc éolien en mer au cours de leur route migratoire, la plupart du temps en augmentant leur hauteur de vol à l'approche des éoliennes et en modifiant leur trajectoire de vol en pratiquant un méso-évitement. Les scientifiques observent une saisonnalité, avec un vol majoritairement à hauteur de pales (50%) à l'automne, contre 18.5% du temps au printemps. Il est cependant difficile de tirer une conclusion à ce sujet, les paramètres liés à la mesure altitudinale du vol étant difficiles à isoler (68). L'effet barrière affecte donc les oiseaux marins mais aussi les migrateurs terrestres. Toutefois, peu d'études permettent de connaître l'incidence de cet effet sur ces oiseaux. Les études Migralion et Migratlane menées en France devraient pouvoir apporter des compléments sur ces questions. Nous y reviendrons dans la section suivante.

iv. UN BESOIN DE CONNAISSANCES SUR LE COMPORTEMENT DE VOL DES OISEAUX QUI FREQUENTENT L'ESPACE MARITIME NATIONAL

Pour les oiseaux marins, la plupart de la littérature publiée à ce jour porte sur des espèces d'oiseaux présents en mer du Nord, mer Baltique et sur les côtes de l'Atlantique Nord. Si les connaissances sur les interactions oiseaux marins-parc éolien en mer ont progressé, elles demeurent particulièrement insuffisantes pour caractériser les effets de collision, déplacement

⁶ Aux échelles meso et macro – respectivement une zone allant jusqu'à 3.5 et 30km autour du parc éolien

et barrière sur les espèces qui ne fréquentent pas ces mers. Les premières recherches sur la vulnérabilité d'espèces d'oiseaux évoluant dans d'autres zones géographiques où est envisagé le développement de parcs éoliens marins commencent seulement à être menées. Un suivi par pose de balise télémétrique et de capteur d'humidité a permis d'étudier les caractéristiques du vol des puffins de Scopoli (*Calonectris diomedea*) (**Photo 5**), espèce présente en mer Méditerranée, où des projets de parcs éoliens flottants sont en cours de développement (69). Ces puffins ont une hauteur moyenne de vol au-dessus de l'eau de 1.8 m, soit inférieure à la hauteur moyenne en bas de pales. Ainsi, comme les puffins des Anglais dans la Manche et la mer du Nord, les puffins de Scopoli ne devraient voler que rarement dans la zone balayée par le rotor (d'une hauteur comprise en 30 mètres et 250 mètres au-dessus de l'eau environ) mais pourraient connaître une perte importante d'habitat fonctionnel (69).



Photo 5 - Puffin de Scopoli

De manière générale, le manque de connaissances sur la distribution des oiseaux en mer et les routes migratoires, est un frein et une limite à la modélisation des impacts de l'éolien en mer sur le compartiment aérien, mais également à la bonne prise en compte des enjeux avifaune dans la planification de l'éolien en mer. En France, plusieurs projets de recherche sont en cours qui doivent permettre d'améliorer les connaissances sur le sujet.

Deux projets de recherche nationaux de grande ampleur, pilotés par l'Office Français de la Biodiversité et France Energies Marines, sont en cours de réalisation. Ces programmes concernent particulièrement les oiseaux migrateurs.

- Le programme Migralion qui vise à caractériser conjointement « l'utilisation du golfe du Lion par les migrateurs terrestres et l'avifaune marine », lancé en avril 2021, s'achèvera en 2025. Plusieurs moyens de mesures et de suivis sont déployés : radars, télémétrie, campagnes d'observation en mer, enregistrements acoustiques, baguage (70). Un radar est installé en Camargue et un second, mobile, est déplacé le long de la côte au moment des migrations. Plus de 1000 oiseaux, de 35 espèces différentes, dont 30 migrateurs terrestres, sont équipés d'une balise télémétrique, ce qui améliorera les connaissances

jusqu'ici parcellaires sur le tracé de leurs routes migratoires. Enfin, deux campagnes en mer sont réalisées annuellement, permettant de caractériser la distribution spatiale des oiseaux en mer.

- Le programme Migratlane vise, lui, à caractériser « l'utilisation de l'arc Atlantique Nord-Est par les migrateurs terrestres, les oiseaux marins et les chauves-souris ». Lancé en novembre 2022 avec une fin prévue en 2027, le projet adopte la même méthode que le programme Migralion avec, en plus, des campagnes aériennes (71). Un suivi par télémétrie est prévu pour étudier les déplacements de 13 espèces d'oiseaux marins en phases d'alimentation, dispersion, repos et hivernage, ainsi que les trajets maritimes de migration de 12 oiseaux d'eau terrestres, 6 espèces de grands migrateurs terrestres et 12 de petits migrateurs terrestres (71).

D'autres projets sont en cours de finalisation, en particulier sur les interactions oiseaux-parcs éoliens flottants. C'est le cas notamment du projet PIAFF&CO (pour Pressions et Interactions en Atlantique de l'éolien offshore : Chiroptères et Oiseaux), financé par l'ADEME, et utilisant le retour d'expérience de la première éolienne en mer FloatGen (© BW Ideol) et de données in situ sur le site d'essais SEM-REV (9).

v. IMPACTS DEMOGRAPHIQUES DES EFFETS DE DEPLACEMENT ET EFFETS BARRIERE

Plusieurs travaux tentent de mesurer l'impact démographique associé aux effets de déplacement et barrière. Pour calculer les impacts de ces effets sur les populations d'oiseaux, il faut procéder en plusieurs temps : premièrement, quantifier les effets et la proportion d'oiseaux qui sont affectés – les connaissances à ce sujet ont été présentées dans le B) ; puis quantifier les conséquences énergétiques (58), et traduire les conséquences de ce surcout énergétique en termes de modifications des paramètres démographiques (baisse de survie et/ou fécondité) ; pour enfin quantifier/prédire les conséquences que cela aura sur la trajectoire démographique des populations (58).

L'effet « déplacement » peut avoir des impacts sur les populations, en particulier lorsque cette perte d'habitat engendre une baisse des fonctions écologiques des zones d'alimentation sur lesquelles ils se reportent. Les populations de la Manche en particulier, qui sont concentrées là où de nombreux parcs sont développés, peuvent être confrontées à des pertes d'habitat fonctionnel importantes. Leur aire de répartition peut être réduite de plus de la moitié (72). À ce jour, la capacité des populations de Plongeurs catmarins à se redistribuer spatialement dans les mers européennes ainsi que les risques en matière de dégradation de leur condition physique sont mal connus (52,73).

Passer de la caractérisation de l'effet de déplacement et de l'évaluation de la vulnérabilité spécifique à une évaluation de son impact démographique est difficile (56). Un modèle qui vise à estimer les conséquences de l'effet de déplacement et de l'effet barrière sur les populations a été élaboré pour les guillemots de Troil de l'île de May, en Ecosse (74). L'étude avance que le déplacement augmente le coût du nourrissage, à cause de l'allongement du trajet mais aussi de la baisse de densité de proies du fait de la compétition accrue entre oiseaux, ce qui a des effets

à la fois sur les populations déplacées mais aussi les oiseaux qui se nourrissaient déjà dans la zone de report – effet indirect là aussi complexe à mesurer (74). D'autres modèles ont été développés pour prédire les budgets temps/énergie des oiseaux marins reproducteurs pendant la période d'élevage des poussins vis-à-vis de projets de parcs éoliens planifiés et non encore construits. Ces modèles ont pour objectifs de traduire ces données en projections de survie annuelle et de productivité au niveau individuel et au niveau de la population (58). Des recherches indiquent que l'effet de déplacement pourrait être un facteur d'altération de la condition physique des plongeurs en période hivernale, mais leur bilan énergétique annuel n'a pas encore été calculé précisément (75).

Concernant l'effet barrière, on manque à ce jour d'outils pour quantifier précisément le coût énergétique engendré par ce dernier, et donc la mortalité associée (67). Des capteurs permettant de mesurer la dépense énergétique en vol existent, mais la pose de balise avec capteur calorimétrique pour calculer le coût énergétique additionnel de l'effet barrière n'est pas documentée dans la littérature. Les connaissances recueillies/compilées simplement par analyse des trajectoires de vol sont insuffisantes, en particulier car l'effet barrière ne peut se réduire à une addition de distance avec un effet linéaire et a des conséquences indirectes difficiles à mesurer. Des travaux ont mis en évidence que les vols des pétrels et des puffins sont optimaux en termes de maximisation des bénéfices énergétiques des vents latéraux, ce qui explique leurs voyages d'alimentation suivent une trajectoire circulaire (76,77). L'évitement des parcs éoliens en mer peut donc les obliger à prendre un itinéraire suboptimal (par exemple en vents contraires), avec un coût énergétique additionnel supérieur au seul coût additionnel engendré par l'allongement du trajet. De plus, en parcourant de plus grandes distances pour s'alimenter, les oiseaux nicheurs sont amenés à diminuer leur temps de surveillance des couvées ce qui peut avoir des impacts négatifs sur le taux de survie des poussins. Cet impact est cependant très difficile à isoler d'autres facteurs (64).

Ainsi, les impacts démographiques des effets de déplacement et de l'effet barrière sont encore très difficiles à estimer. Il apparaît cependant que ces effets ont probablement des impacts sur les taux de survie des adultes et des juvéniles, mais également sur le succès reproducteur.

C) Impacts cumulés

Résumé

- Avec la multiplication des parcs éoliens en mer, la prise en compte des effets combinés des parcs sur les oiseaux devient indispensable.
- De la même manière, il importe de prendre en compte le cumul des impacts des différentes pressions anthropiques sur les populations d'oiseaux (captures accidentelles, pollution, *ect*).
- Les études traitant du cumul des incidences sur une échelle spatiale et/ou temporelle étendue sont rares. Pourtant, il apparaît essentiel d'avoir une vision agrégée des interactions parcs-oiseaux au cours de la vie de ces derniers pour estimer les impacts démographiques sur les populations d'oiseaux.
- Le développement de l'éolien en mer peut engendrer un risque accru de détérioration de l'état de conservation de certaines espèces d'oiseaux, en particulier les espèces longévives déjà en mauvais état de conservation. La définition des seuils d'acceptabilité de mortalité additionnelle liée aux impacts de l'éolien en mer doit être guidée par la science.

Nous avons jusqu'ici fait état des connaissances sur les effets localisés de l'exploitation de parcs éoliens en mer sur les oiseaux. Dans la perspective de traduire ces effets, facteurs de mortalité, en impacts sur les populations d'oiseaux, il est indispensable de considérer la pluralité d'interactions oiseaux-parcs éoliens au cours de la vie de ces oiseaux. Il est important d'adopter une approche spatiale holistique et intégrative dans la caractérisation des impacts sur la faune volante. Dans cette section, on expose les recherches publiées à ce jour sur la dimension cumulative des impacts des différents parcs et des autres pressions anthropiques sur les populations d'oiseaux.



Photo 6 - Colonie de fous de Bassan – une espèce longévive exposée au développement de l'éolien en mer.

i. PRENDRE EN COMPTE LES IMPACTS DES EFFETS COMBINÉS DES ACTIVITÉS ANTHROPIQUES SUR L'AVIFAUNE

Pour établir une planification maritime qui prenne en compte les impacts négatifs des parcs éoliens en mer sur les oiseaux afin de les minimiser, il convient de se placer à la bonne échelle biogéographique. En particulier, avec la multiplication récente des parcs éoliens, mesurer isolément les effets d'un parc éolien sur une population d'oiseaux qui évoluerait dans une zone géographique où sont implantés plusieurs parcs, n'a plus beaucoup de sens (78).

Pour rappel, un **effet**, qui peut être positif, négatif ou neutre, produit un **impact** dès lors qu'il conduit à « une modification d'un paramètre ou d'une mesure importante de l'espèce ou du groupe concerné, telle qu'une baisse significative du nombre, de la densité ou d'un paramètre de population » (8). D'un point de vue scientifique, on définira ainsi les **effets cumulés** des activités anthropiques : « Les effets cumulatifs sont ceux causés par l'action combinée d'activités passées, présentes et futures, qui ne sont pas exclusivement liées à un secteur et qui couvrent tous les types d'activités humaines dans une zone donnée » (79) (**Figure 6**). Les connaissances sur les effets cumulés de l'éolien en mer sont peu fournies. En France, les travaux du Groupe de travail sur les Effets CUMulés des projets d'énergies Marines renouvelables sur l'Environnement marin (GT ECUME), créé en 2018 et réunissant experts et scientifiques, visent à documenter les effets cumulés des projets de parcs éoliens en mer.

Du point de vue réglementaire (article R122-5 du code de l'environnement), il y a seulement obligation pour les projets soumis à une évaluation environnementale de publier une étude sur le « cumul d'incidences avec d'autres projets » soumis à étude d'impact. Cela exclut donc les activités de pêche ou de nautisme par exemple⁷ (non soumises à étude d'impact). En pratique, ne sont par ailleurs quasiment jamais pris en compte les impacts cumulés avec des projets situés sur les différentes zones fonctionnelles non immédiates, ou sur les tracés migratoires des espèces. Pourtant, les aires d'alimentation des populations d'oiseaux marins nicheuses peuvent s'étendre très loin des colonies (par exemple les Fous de Bassan des Sept-Iles en Côte d'Armor rayonnent chaque jour dans un rayon de 100 km), et pour les populations migratrices et hivernantes d'espèces provenant de toute l'Europe, certaines parcourent des dizaines de milliers de km et pourront être confrontées à une multitude de parcs éoliens dans leur vie (51).

Les **impacts cumulés** peuvent désigner à la fois le cumul des impacts de plusieurs projets de parcs éoliens en mer, sur toute ou partie des composantes écosystémiques, et le cumul de ces impacts avec ceux des autres sources de pression anthropique (pêche, trafic maritime...). Notons que de nombreuses études utilisent le terme d'impacts cumulés alors que leurs résultats portent seulement sur des effets directs (80). Ces impacts cumulés devraient aussi prendre en compte les **effets indirects**, qui concernent principalement les incidences de l'éolien en mer sur les ressources alimentaires des oiseaux. Enfin, les effets, à un niveau écosystémique, des dérèglements climatiques sur la vulnérabilité de l'avifaune vis-à-vis des risques présentés

⁷ Article R122-5 du code de l'environnement.

(augmentation des phénomènes météorologiques extrêmes...) sont insuffisamment voire pas du tout caractérisés.

	Directs	Indirects	Cumulés
Effets	Collision, dérangement...	Modifications des processus biotiques ou physiques (baisse de la ressource alimentaire, altération du milieu...)	Cumul des effets directs et indirects de plusieurs projets et/ou facteurs de pression provenant d'autres activités anthropiques
Impacts	Selon la gravité, intensité ou durée de l'effet. Positif (augmentation du succès reproductif...) ou négatif (mortalité associée...)	Selon la gravité, intensité ou durée de l'effet indirect.	Cumul des impacts directs et indirects de plusieurs projets et facteurs de pression provenant d'autres activités anthropiques

Figure 6 - Définitions adaptées de Boehlert & Gill 2010

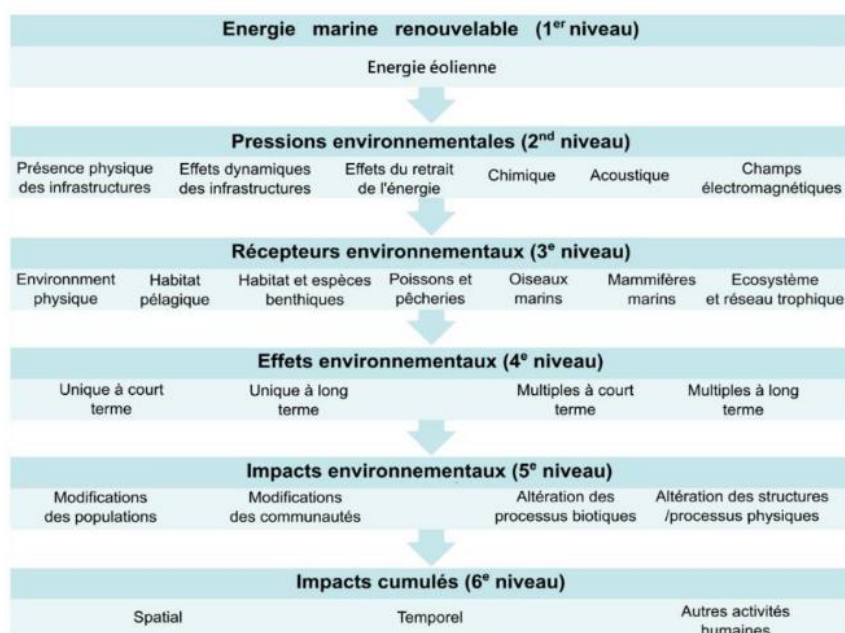


Figure 7 - Cadre méthodologique des échelles de prise en compte des effets environnementaux, issu du référentiel technique de l'Office Français de la Biodiversité (OFB) sur l'éolien en mer (2023), adapté de Boehlert & Gill 2010 (80).

Deux approches sont à distinguer dans la mesure des effets cumulés. L'approche **par pression** (*stressor*), qui considère les impacts agrégés par exemple d'un parc éolien en mer et permet de comparer les parcs entre eux. Et celle **par récepteur** (*receptor*), qui peut être une population d'oiseaux ou de mammifères marins, et qui devrait être le point focal de toute analyse d'impacts cumulés dans une perspective de protection des espèces et d'atteinte du bon état écologique des milieux (80). Le GT ECUME préconise ainsi de mesurer les effets sur des récepteurs prioritaires (81). Notons enfin qu'il y a de possibles interactions non-linéaires (*in-combination*) des effets cumulés, sur lesquelles nous manquons à ce jour de connaissances. La plupart des études scientifiques font l'hypothèse d'une additionalité linéaire des effets (44).

Dans la plupart des cas, les évaluations d'impacts cumulés conduites dans le cadre d'études d'impact et d'études scientifiques, sont limitées aux impacts de plusieurs parcs éoliens ou sources d'énergies renouvelables, sans prendre en compte les autres activités anthropiques, et considèrent une étendue spatiale et une échelle temporelle (accumulation d'impacts dans le temps) limitées (28). Pour être exhaustifs dans la cartographie des impacts, il faudrait élargir le champ géographique d'analyse de ces impacts aux tracés migratoires et à l'ensemble des zones fonctionnelles des espèces-réceptrices qui ne sont présentes qu'une partie de leur cycle annuel sur le site du parc éolien.



Photo 7 - Bateau de pêche et laridés. L'espace maritime est soumis à une multitude d'usages.

ii. IMPACTS CUMULES DANS UNE AIRE GEOGRAPHIQUE RAPPROCHEE

La première évaluation prospective des impacts cumulés sur les populations d'oiseaux a pris en compte le cumul des impacts modélisés d'un scénario de dix parcs dans la partie néerlandaise de la mer du Nord. L'étude porte sur quinze espèces d'oiseaux identifiées comme présentes sur la zone. Pour les deux populations d'oiseaux qui ont une tendance démographique négative qui précède le développement de l'éolien en mer (Goéland argenté et Cygne de Bewick -*Cygnus columbianus bewickii*-), l'impact cumulé des collisions accélère cette tendance au déclin (82).

D'autres études sur les impacts cumulés de plusieurs parcs ont été effectuées pour étudier cette fois l'effet de déplacement. En Allemagne, des scientifiques ont effectué une analyse BACI de la distribution des guillemots de Troil et des mouettes tridactyles sur la zone de quatre parcs éoliens en mer au nord de Heligoland, et montré une saisonnalité dans l'impact cumulé du déplacement (62). Une étude récente sur les effets combinés de la construction de plusieurs parcs sur les Plongeurs sur une large zone en mer du Nord, révèle que les plongeurs évitent de manière régulière (baisse de 63% des effectifs) les alentours des parcs dans un périmètre de 10 km autour de ceux-ci (73). La représentation graphique de leur distribution en mer (Figure 8) témoigne d'un phénomène de redistribution à grande échelle. Les oiseaux se regroupent dans leur aire de distribution d'origine, mais aussi loin que possible des parcs éoliens. Les conséquences de cette perte d'habitat et cette redistribution spatiale globale en matière de coût énergétique – les oiseaux occupant généralement d'abord les habitats de meilleure qualité, les zones de report sont probablement plus pauvres - ne sont néanmoins pas suffisamment étudiées à ce stade.

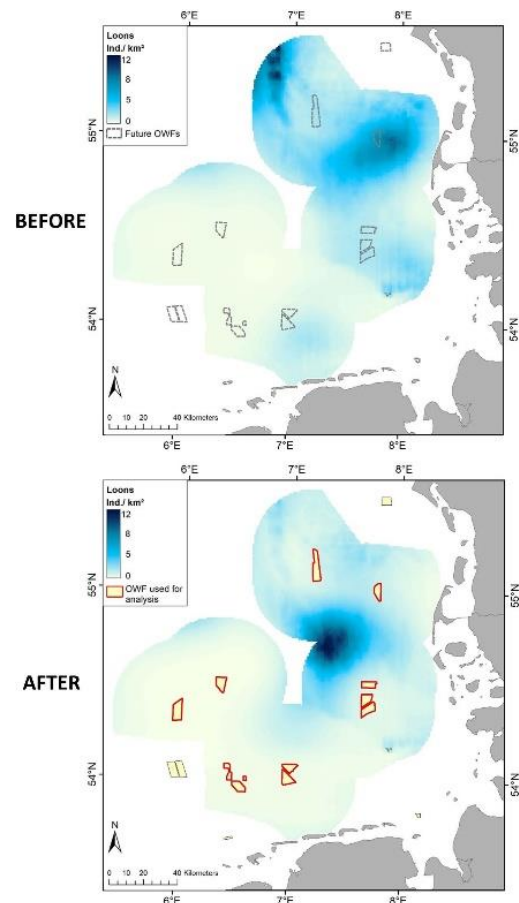


Figure 8 Distribution modélisée des plongeurs (individus par km²) avant et après la construction des parcs éoliens, combinée pour les cinq groupes de parcs éoliens. Crédits : Garthe et al. 2023.

Rares sont les études qui portent sur le cumul d'impacts avec ceux d'autres activités anthropiques. L'étude sur l'effet de déplacement des plongeurs d'un ensemble de quatre parcs dans la partie allemande de la mer du Nord est la première à prendre en compte l'effet des perturbations engendrées par le trafic maritime couplé avec celui des parcs éoliens. Elle révèle que les nuisances des bateaux ont un impact négatif additionnel sur les densités d'oiseaux sur les zones où se situent les parcs (60).

Des modélisations spatiales de l'impact cumulé des effets de déplacement induits par des parcs commencent à être développées. En Belgique, ont été produits des modèles de distribution spatiale de quatre espèces sensibles à cet effet (Plongeon catmarin, Fou de Bassan, Guillemot de Troïl et Pingouin torda) sur la zone de Vlaamse Banken où plusieurs parcs éoliens en mer doivent être implantés. Les projections se concentrent sur le mois où la densité des oiseaux en mer est maximale. Ces modèles sont construits à l'aide d'un indice de sensibilité au déplacement (83). Dans chaque cas, la présence des parcs éoliens exerce une influence sur la distribution spatiale des oiseaux. Les cartes produites, si elles ne sont que le résultat d'une première tentative et mériteraient de prendre en compte d'autres facteurs de dérangement, permettent d'informer la planification maritime, de guider le choix de zones d'implantation et/ou d'éventuelles mesures compensatoires sous la forme de créations de zones de protection [cf. Chapitre 2 - A)ii] (83).

Au-delà de mesurer les impacts cumulés à un moment donné, il importe aussi d'estimer leur cumul dans le temps. À notre connaissance, il n'existe qu'une seule étude qui prenne en compte cette dimension temporelle (84). Cette étude considère tous les parcs en mer du Nord dont la mise en service est prévue au plus tard pour 2027 et calcule combien seront en phase d'exploitation jusqu'en 2050. L'étude propose une représentation spatio-temporelle des impacts cumulés de ces parcs, détaillant par pays les zones au sein desquelles seront localisés les impacts. Les auteurs considèrent les impacts sur une large gamme de composantes de l'environnement dont trois espèces d'oiseaux marins (Guillemot, Pingouin torda, Fulmar boréal (*Fulmarus glacialis*)) en utilisant une base de données sur leur distribution en mer (84). L'analyse agrégée fait ici ressortir le fait qu'en mer du Nord, l'intensité des impacts de l'effet barrière devrait à l'avenir affecter principalement les guillemots et les fulmars, leurs aires de distribution recoupant largement celles d'implantation des futurs parcs éoliens en mer du Nord (par comparaison avec le Pingouin torda).

Une récente étude sur les impacts cumulés sur plusieurs espèces d'oiseaux et de mammifères marins en mer du Nord est particulièrement intéressante. Prenant en compte les impacts cumulés d'un large panel de pressions anthropiques et des effets collision, déplacement et barrière de l'éolien en mer, elle étudie le risque d'impact à horizon 2030 et 2040 (85). Pour les populations d'oiseaux marins, il ressort de cette analyse que le développement de l'éolien en mer augmente fortement le risque d'impact pour les espèces suivantes : Mouette tridactyle, Goéland marin, Fou de Bassan, Grand Labbe (*Stercorarius skua*) et Fulmar. L'état de conservation de certaines de ces espèces est actuellement défavorable dans l'Union Européenne (Mouette tridactyle, Goéland marin et Fulmar boréal) et selon les chercheurs devraient faire l'objet d'une attention particulière dans le cadre du développement de l'éolien en mer du Nord (85).

iii. IMPACTS A L'ECHELLE DES ROUTES MIGRATOIRES DES OISEAUX

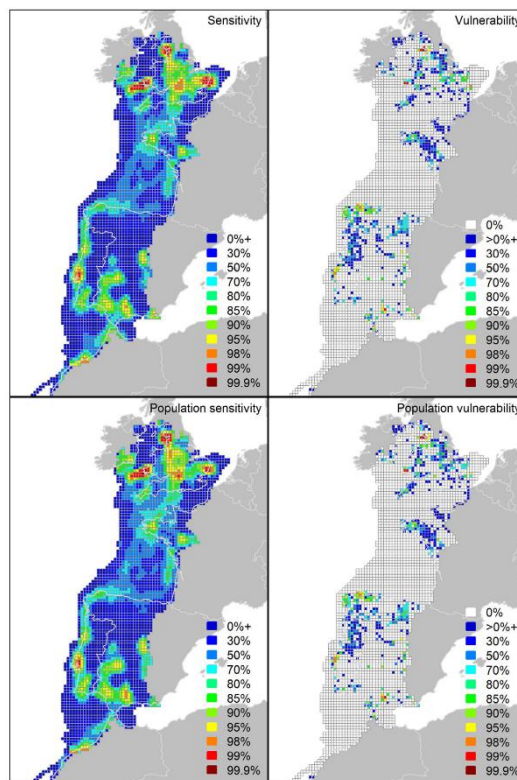
On l'a mentionné, lorsque la modélisation ne prend en compte qu'un parc éolien, l'effet barrière peut apparaître marginal, en particulier pour les oiseaux migrateurs qui ne passent que deux fois par an sur le site du parc. Cependant, la multiplication de parcs éoliens, notamment en mer du Nord et dans la Manche, pourrait imposer des détours plus fréquents et importants aux

oiseaux migrateurs. Fin 2022, on comptait en effet près de 6 000 éoliennes en mer réparties dans 12 pays d'Europe, dont au moins 4000 en mer du Nord.

Les fous de Bassan par exemple, sont particulièrement à risque car leur zone d'alimentation est très étendue. Ils peuvent rencontrer de nombreux parcs éoliens après leur période de nourrissage lors de leur migration (86), alors qu'ils sont déjà potentiellement affectés par l'effet barrière lors de leurs trajets de nourrissage quotidiens.

Les espèces d'oiseaux marins migrateurs, comme le Goéland brun, peuvent de plus être exposés à des risques de collision à la fois avec les parcs éoliens terrestre et marins, ainsi qu'avec les réseaux de ligne électrique (87). Une analyse spatiale de données acquises par télémétrie (Figure 9), a permis d'identifier les routes migratoires principales des Goélands bruns en Europe ainsi que les zones où ils sont le plus vulnérables à ces infrastructures au cours de leur cycle annuel (87).

Figure 9 Vulnérabilité annuelle combinée de trois colonies, représentée à la fois par la sensibilité et la vulnérabilité des colonies individuelles (ligne du haut) et au niveau de la "population", en pondérant les surfaces (ligne du bas) par la taille globale de la population de chaque colonie. Crédits : Thaxter et al. 2019.



Une vaste étude de la

vulnérabilité de 27 espèces d'oiseaux migrateurs en Europe et Afrique du Nord à l'éolien terrestre et aux lignes électriques a permis d'identifier les hotspots de la vulnérabilité au risque de collision, principalement situés autour des détroits de Gibraltar et du Bosphore (88). Il serait intéressant qu'une étude similaire soit conduite vis-à-vis des risques en mer. À notre connaissance, il n'existe pas à ce jour d'étude ayant étudié les éventuels changements dans les schémas de migration induits par le développement exponentiel de l'éolien en mer.

iv. PRISE EN COMPTE DES IMPACTS CUMULES DANS LE CALCUL DES IMPACTS DEMOGRAPHIQUES

La seule tentative à ce jour, de traduire l'effet de déplacement cumulé en impact sur une population d'oiseaux, a été publiée en 2022. L'institut de recherche maritime de Wageningen (Pays-Bas) a créé un modèle et proposé une estimation projective de la mortalité aviaire pour les dix espèces les plus sensibles à la perte d'habitat fonctionnel causée par l'ensemble des parcs éoliens situés au sud de la mer du Nord, jusqu'en 2030 (89). Dans la ZEE néerlandaise, les projections font état d'une mortalité annuelle additionnelle liée à l'effet de déplacement égale à 1955 individus par an, dont 72.6% de Guillemot de Troïl, et 19% de Pingouins torda (89). Ces deux espèces représentent ainsi plus de 90% de la mortalité projetée. Dans les ZEE danoise et

allemande, ce sont surtout les espèces de Plongeurs qui sont affectées par l'effet de déplacement. À l'échelle de l'ensemble des parcs éoliens du sud de la mer du Nord, la mortalité totale liée à la perte d'habitat fonctionnel (et au risque de collisions considéré seulement pour les sternes et fous de Bassan) représente plus de 18 000 oiseaux selon ces modélisations. Les taux estimés de mortalité due à la perte d'habitat sont les plus élevés pour le Guillemot de Troil et le Pingouin torda (89). Suivant ces projections, le seuil du niveau d'impact acceptable (ALI), défini par un bureau d'étude (90) n'est franchi pour aucune espèce, mais beaucoup de paramètres sont basés sur des données lacunaires (distribution spatiale des oiseaux en mer, etc.). Là encore par ailleurs, sont uniquement pris en compte les impacts de l'éolien en mer. Il manque ainsi une vision écosystémique des impacts.

Un autre défi majeur est de passer du calcul des effets cumulés à celui des impacts cumulés. Pour ce faire, il s'agit de traduire les impacts potentiellement multiples de l'éolien en mer (collision, dérangement) sur les individus en impacts au niveau de la population concernée, en modélisant des changements dans les taux démographiques (28). Si les modélisations des impacts cumulés présents et futurs permettaient d'avoir une vision d'ensemble, il s'agirait ensuite sur la base de ces modélisations d'estimer les impacts à long terme sur les populations d'oiseaux. Une telle modélisation prospective a été proposée pour étudier les impacts cumulés de futurs parcs sur une population de fous de Bassan. Ce modèle spatialisé individu-centré (*Individual-based* (IBM)) des impacts des parcs éoliens existant et en projet en Manche et mer du Nord sur une population de fous de Bassan, considère trois facteurs : la perte de masse corporelle, le taux de mortalité et le succès reproducteur (91). Les auteurs de l'étude ont testé différents scénarios où les fous évitent complètement les parcs, ou y entrent, et sont ainsi exposés à un risque de collision. Ont aussi été testés différents paramètres dépendants des caractéristiques spatiales des parcs. Ces modèles ne trouvent pas d'impact sur la mortalité et la viabilité de la population de fous de Bassan dans le scénario d'évitement complet des parcs, et un impact négligeable dans le scénario avec risque de collision. Dans ces modélisations, l'augmentation de la superficie des parcs entraîne un impact de l'effet de déplacement plus important que celui du risque estimé de collision, indiquant que les impacts cumulés liés à l'effet de déplacement pourraient être un facteur de mortalité non négligeable dans les zones à forte densité de parcs comme la Manche (91). Selon une méta-analyse récente financée par le développeur danois Ørsted, la mortalité associée à l'effet de déplacement pour les fous de Bassan n'excéderait pas 1% de la population locale, contre le seuil de 10% utilisé dans la modélisation susmentionnée (92). Pour des espèces longévives déjà en mauvais état de conservation, une mortalité additionnelle de 1% suffirait cependant à faire peser un risque sur la survie à long terme de ces espèces (51,93).

En définitive, la détermination d'un seuil à partir duquel les impacts sur les populations d'oiseaux sont significatifs est cruciale. Calculer les impacts cumulés permet d'avoir une vision agrégée de la mortalité associée aux différents effets négatifs sur l'avifaune, en prenant idéalement en compte tous les effets, directs et indirects de l'exploitation des parcs éoliens en mer et des autres activités humaines. Pour guider la décision, l'étape suivante est de déterminer quels impacts démographiques mettent en péril la survie des populations. Des seuils binaires comme l'*acceptable biological change* (ABC), proposé par l'agence gouvernementale écossaise, non validé dans la littérature scientifique mais pourtant largement utilisés dans les études d'impact, apparaissent arbitraires (48). Il convient d'adopter la plus grande vigilance dans l'interprétation des résultats des modèles, et en particulier lorsque des seuils d'acceptabilité non-fondés sur la science conduisent les auteurs d'études d'impact à conclure que les projets n'ont pas d'effet sur l'intégrité des populations. L'utilisation de modèles plus conservateurs et plus robustes, comme le modèle de matrice de Leslie, n'aboutissent pas à des conclusions si tranchées (48). Le choix du seuil à partir duquel les impacts démographiques cumulés mettent en péril les populations d'oiseaux, doit être effectué au cas par cas et sur la base des meilleures connaissances scientifiques (28,94).



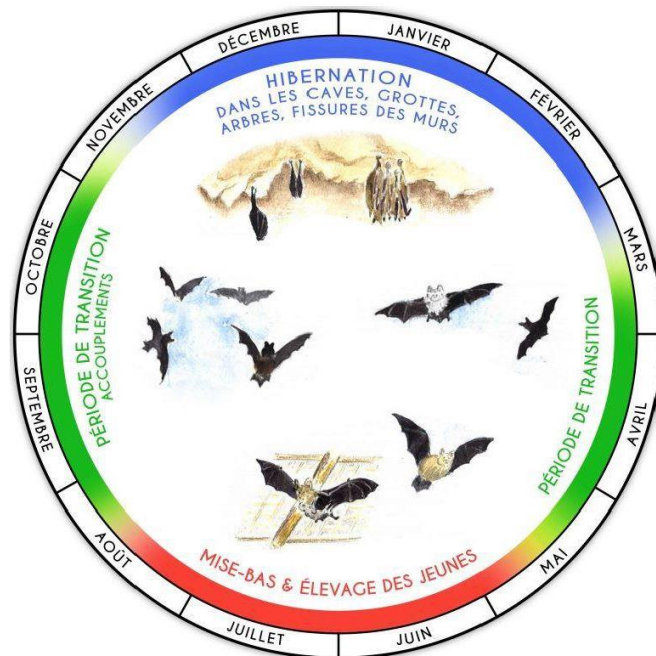
Photo 8 - Fou de Bassan en vol

Partie 2 – Impacts sur les chiroptères

Résumé :

- Le danger d'exposition des chauves-souris aux parcs éolien en mer est difficile à caractériser car on manque à ce jour de données sur leur présence en mer et leur comportement de vol.
- Les chauves-souris sont exposées aux risques de collision et de barotraumatisme, soit lors de leur route migratoire, soit lorsque leur gîte est situé sur le littoral et qu'elles viennent s'alimenter d'insectes attirés par les éoliennes.
- Les espèces de chiroptères sont déjà dans un état de conservation défavorable, les impacts additionnels liés au développement de l'éolien en mer et au cumul d'impacts pourraient avoir des conséquences importantes sur la survie de ces espèces.

Les chiroptères présents en Europe sont des mammifères volants exclusivement nocturnes. Leurs caractéristiques comportementales et biologiques distinctes de celles des oiseaux, justifient de présenter séparément leurs enjeux de sensibilité aux parcs éoliens en mer. Tous les chiroptères ne migrent pas. Leur cycle biologique annuel se séquence en plusieurs phases : hibernation, période de transition (avec migration ou non) et période de mise-bas et élevage des jeunes.



© LPO Auvergne-Rhône-Alpes

Figure 10 - Le cycle biologique des chiroptères

Que sait-on de la sensibilité des chiroptères aux éoliennes en mer ?

En mer du Nord, les populations importantes de différentes espèces de chauve-souris migratrices nichant sur l'île allemande de Jütland, faisaient craindre dès les années 2010 des risques de mortalité importants avec le développement d'éolien en mer (95). Ce n'est toutefois que récemment que les vols de chiroptères non migrants au large des côtes ont été documentés avec certitude. Ainsi, jusqu'à peu, la question des potentiels impacts des infrastructures en mer sur les chiroptères sédentaires ne se posait pas. La plupart des études sur les interactions chiroptères-parc éolien concernent l'éolien terrestre. Il n'existe pas pour l'éolien en mer d'équivalent aux synthèses des cas de mortalité de chiroptères réalisées au niveau des parcs éoliens terrestres (96). En Europe, une compilation fait état de 28 espèces retrouvées au pied des éoliennes terrestres (97). Malgré des recherches en mer balbutiantes, on sait déjà que plusieurs espèces de chauve-souris, migratrices et non-migratrices, sont potentiellement affectées. De plus, l'importance des îles en mer du Nord pour les chauves-souris migratrices a été démontrée, faisant craindre de potentiels impacts importants dans les zones archipélagiques marquées par un fort développement de l'éolien en mer (98).

A) Effet « Collision »

Le premier effet potentiel des parcs éoliens en mer sur les chiroptères à avoir fait l'objet d'une attention est l'effet de collision. La première étude, menée en Suède à partir de 2005, sur le comportement des chiroptères en mer Baltique lors de leur migration, a mis en évidence qu'il arrive à plus de la moitié des espèces de chiroptères scandinaves de voler au-dessus de la mer, souvent à une altitude peu élevée au-dessus des flots, bien moins haute que lorsqu'elles survolent des zones terrestres – ce qui peut s'expliquer par des difficultés à s'écholocaliser en mer (99). Il a ensuite été question d'estimer les risques de collision de ces chauves-souris migratrices avec les éoliennes en mer d'un parc situé dans le détroit de Kalmar, en Suède. Pour ce faire, cinq méthodes complémentaires ont été mobilisées : un inventaire au niveau de deux sites de départ des chiroptères, une campagne de détection du vol des chauves-souris par bateau pendant 14 nuits, la pose d'un radar permettant de quantifier l'abondance des chiroptères, un système de détection automatique des chauves-souris, posé à la base de turbines, et enfin une caméra thermique permettant d'enregistrer les mouvements des chiroptères autour des éoliennes (20). Sur le site étudié, la plupart des vols avaient lieu 3 heures après le coucher du soleil, en août et septembre. Il est aussi apparu que si les chiroptères volent en moyenne entre 10 et 40 m au-dessus des flots, leur hauteur de vol peut varier à l'approche des turbines, en particulier pour la Noctule Commune (*Nyctalus noctula*), espèce identifiée le plus fréquemment par le radar.

Quatre espèces de chiroptères ont été observées au large en mer du Nord dont la Pipistrelle de Nathusius (*Pipistrellus nathusii*), repérée à 25 km des côtes belges (100). Cette espèce est également la plus présente un peu plus au nord, au large des Pays-Bas (101). Les chauves-souris qui migrent à l'automne en passant par la mer Baltique ou la mer du Nord, ne traversent la mer que lors de nuits aux conditions météorologiques favorables (absence de pluie et pression atmosphérique normale) (101). Les chauves-souris sont surtout détectées en septembre et octobre, au moment du pic de la migration, et principalement lorsque les vents soufflent du Nord-Est et du Sud-Est (102).



Photo 9 - Pipistrelle de Nathusius en vol. Cette espèce a été observée volant au travers de parcs éoliens en mer.

Trois hypothèses pour expliquer les collisions des chiroptères avec les éoliennes terrestres ont été émises. Il s'agirait soit de la survenue d'un évènement aléatoire, soit le résultat du fait que les chauve-souris ont parfois un comportement de vol qui accroît le risque de collision, ou bien il s'agirait d'un facteur non aléatoire lié au naturel curieux des chiroptères (103). La dernière hypothèse, comportementale, est aujourd'hui privilégiée. En mer Baltique il a été observé à cinq reprises que des noctules s'approchaient des turbines alors que celle-ci étaient à l'arrêt mais éclairées, le parc éolien en mer ayant cessé son activité. Cela a été interprété comme le signe qu'elles y cherchaient de la nourriture (104). Les chauves-souris évoluant la nuit, l'attraction par la lumière est un enjeu sur lequel il convient d'être particulièrement vigilant. Il semblerait que les chiroptères utilisent les infrastructures pour se poser et se nourrir d'insectes (99). La lumière des éoliennes attirant en mer des insectes, les chiroptères peuvent être indirectement attirés par les parcs éoliens, ce qui accentue le risque d'entrer en collision avec le rotor.

En installant des capteurs ultrasons à hauteur de rotor, alors que jusqu'ici les capteurs acoustiques utilisés pour détecter les chiroptères étaient placés au-dessous du rotor, des chercheurs ont démontré qu'il arrive que les pipistrelles volent à hauteur de rotor (93 m au-dessus du niveau de la mer), même si cela reste rare (9 observations sur 151) (100). Une autre espèce, la Noctule commune, est également susceptible d'entrer en collision avec les turbines. Cependant, du fait de sa fréquence d'émission proche du bruit des turbines, il est difficile à ce jour de l'identifier (100). Par ailleurs, lorsqu'elles chassent, l'altitude de vol des chauves-souris

pourrait être nettement plus haute, suivant la localisation des insectes. Plus récemment, le suivi de 21 noctules a mis en évidence que des chauves-souris locales effectuent des trajets en mer pour se nourrir, se déplaçant jusqu'à 18 km de leur gîte (105). Une abondance d'insectes migrateurs à la fin de l'été peut expliquer que les chiroptères locaux s'aventurent en mer pour se nourrir à cette période de l'année (105). Les déplacements en mer semblant minoritaires pour les noctules locales observées aux Pays-Bas, les auteurs avancent que les risques de collision sont faibles et ne devraient pas avoir d'impacts significatifs sur les populations locales. Cependant, les données de validation empirique manquent à ce jour pour pouvoir affirmer avec certitude l'absence d'impacts significatifs sur des populations de mammifères dont l'état de conservation est souvent déjà dégradé. Les chauves-souris volent solitairement ou en petit nombre, ce qui pose des défis pour les détecter à l'aide des technologies radar, même si certaines technologies de détection thermiques permettent de les identifier (24). Il s'agit donc, afin de détecter les collisions de chiroptères, d'utiliser un système de capteurs avec radar, capteurs à ultrasons et caméra thermique. Des projets de recherche sont en cours mais nous n'avons pas connaissance de travaux publiés venant quantifier la mortalité directe par collision des chiroptères avec les éoliennes en mer.

B) Barotraumatisme

À cet effet collision, commun à toute la faune volante, vient s'ajouter pour les chauves-souris un risque de mortalité par barotraumatisme. L'anatomie du système pulmonaire des chauves-souris, appartenant à l'ordre des mammifères, est plus vulnérable que celui des oiseaux aux changements de pression. La dépression d'air qui se forme au passage d'une pale peut entraîner un éclatement des vaisseaux sanguins des chauves-souris, et provoquer une hémorragie interne. Ce problème, lié aux variations de pression autour des pales, a pu être documenté comme la cause principale du décès de chiroptères recensés à proximité d'un parc éolien terrestre au Canada (106). Le barotraumatisme n'entraînant pas une mort immédiate, il est probable qu'une proportion des chauve-souris mortellement blessées par le vortex soit introuvables (107). De plus, si elles n'entraînent pas d'hémorragie, les chutes de pressions pourraient entraîner des lésions du système auditif et s'avérer fatales à plus ou moins court terme, les chauves-souris utilisant l'écholocation pour s'orienter (108). Là aussi, il est impossible de quantifier la mortalité par barotraumatisme dans un contexte maritime où les carcasses sont introuvables.

C) Estimation des impacts sur les populations de chiroptères

La caractérisation des autres effets potentiels sur les chauves-souris des parcs éoliens en mer tout comme pour les parcs éoliens terrestres est aujourd'hui insuffisante (109). Il est difficile de statuer sur un éventuel effet de déplacement dans la mesure où les connaissances sur l'alimentation des chauves-souris en mer sont parcellaires, mais laissent à ce jour penser qu'ils s'apparentent à des comportements opportunistes (110). Aucune recherche n'a été menée en France pour caractériser le comportement en mer des 34 espèces présentes sur le territoire. Dans la mesure où l'on observe plutôt une réaction d'attraction et non d'évitement, la question

d'un possible effet « barrière » pour les chauves-souris migratrices demeure à l'état d'hypothèse.

Pour l'éolien terrestre, un grand nombre d'études menées dans différentes régions du monde montrent que ces installations pourraient menacer la viabilité de certaines populations et entraîner un risque accru d'extinction, impact avéré par exemple dans le cas de la Chauve-souris cendrée (*Lasiurus cinereus*) aux Etats-Unis (111). Il conviendrait donc de mener de plus amples recherches sur les potentiels impacts de l'éolien en mer sur les espèces de chiroptères.

CHAPITRE 2 - MOYENS D'ATTENUATION DES IMPACTS DE L'ÉOLIEN EN MER SUR L'AVIFAUNE ET LES CHIROPTÈRES

Reprenant l'ordre de la séquence Éviter-Réduire-Compenser (ERC), ce chapitre présente les principaux moyens renseignés dans la littérature pour limiter les impacts du développement de l'éolien en mer sur la faune volante. L'état des connaissances étant parcellaire et en évolution constante, en particulier concernant les mesures de réduction et de compensation, ce tour d'horizon n'est ni donc ni exhaustif, ni définitif.

À partir de cette analyse, la LPO a formulé un [cahier de recommandations](#) pour un déploiement de l'éolien en mer plus respectueux de la biodiversité.

A) Eviter les zones sensibles : le moyen le plus efficace de réduire les impacts

- Sur la base des connaissances scientifiques disponibles, **le choix des zones d'implantation des parcs éoliens en mer apparaît comme le paramètre déterminant pour assurer le bon état écologique du milieu marin.**
- En effet, il est difficile de se prononcer sur l'efficacité de la plupart des moyens de réduction des impacts mentionnés dans une littérature qui reste mince, et l'efficacité des mesures compensatoires en mer est à ce jour impossible à démontrer.

i. L'ÉVITEMENT DES AIRES MARINES PROTÉGÉES

C'est sur la phase « Évitement », à travers le choix de l'emplacement le moins impactant possible, que repose pour l'essentiel la maîtrise des impacts des projets d'éolien en mer. L'évitement des zones sensibles pour la faune volante, notamment des zones d'alimentation ou des routes migratoires, dans le choix des zones de développement de l'éolien en mer est donc essentiel. Ces zones sensibles sont notamment matérialisées en France par la création d'aires marines protégées. Définies par le code de l'environnement (article L334-1), les AMP sont des espaces délimités en mer qui répondent à des objectifs de protection de la nature à long terme. Les zones du Réseau Natura 2000, outil européen de mise en application des Directives Oiseaux et Habitats, sont désignées en fonction de la présence d'espèces et d'habitats d'intérêt communautaire. En France, la désignation des sites est principalement guidée par les inventaires nationaux des zones naturelles d'intérêt écologique, faunistique et floristique (ZNIEFF) et des zones importantes pour la conservation des oiseaux (ZICO).

Une étude réalisée par la LPO, relative aux suivis de mortalité des parcs éoliens terrestres, montre que les éoliennes présentent un **risque plus important pour les oiseaux dans ou à proximité immédiate des zones Natura 2000 (moins d'un km) avec une mortalité deux fois plus importante** (112). Si l'étude se concentre sur l'analyse des parcs éoliens terrestres, elle montre une dynamique de surmortalité qui pourrait se retrouver en mer. En Europe, aujourd'hui, très peu

de parcs éoliens en mer sont situés dans des aires marines protégées (AMP) dont les zones Natura 2000. La plupart des pays européens considèrent en effet que l'implantation de parcs éoliens est incompatible avec la présence d'AMP (notamment les Pays-Bas, l'Espagne, le Portugal, la Finlande, etc.).

Selon une étude scientifique parue en août 2023, au vu de leurs impacts potentiels sur les habitats et les espèces, il conviendrait d'éviter l'implantation de parcs éoliens flottants sur les sites Natura 2000 méditerranéens, et dans leurs zones périphériques (définies comme des "zones tampons") (113).

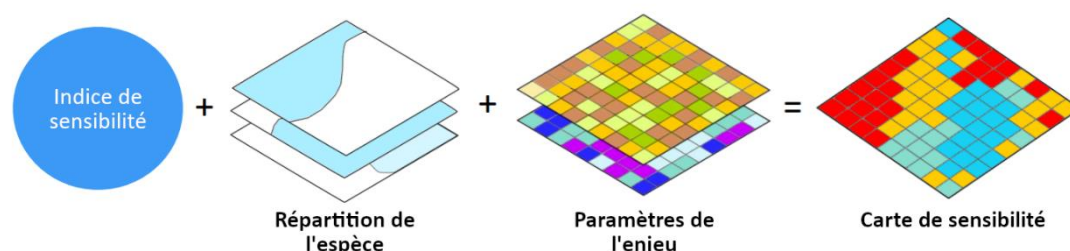
ii. ETABLIR DES CARTES DE SENSIBILITE

Une autre manière de prioriser les zones à éviter pour l'implantation de parc éolien en mer est de créer des **cartes de spatialisation des risques selon la sensibilité de différentes populations d'oiseaux**. Il est en effet possible d'estimer la vulnérabilité relative des espèces aux effets de collision et de déplacement. Ce faisant, la distribution en mer des espèces les plus vulnérables à ces effets pourra être prise en compte dans le choix de zones d'implantation des parcs. Ces cartes peuvent aussi être combinées à des cartes des pressions anthropiques, comme c'est le cas dans le [projet POSEIDON](#) au Royaume-Uni.

En 2022, BirdLife International a rendu public l'outil AviStep qui permet de créer des cartes de sensibilité de l'avifaune (114)⁸. Cette méthodologie a été appliquée en 2023 en Pologne et en Italie afin de déterminer les zones de développement de l'éolien en mer de moindre impact du point de vue de la conservation de l'avifaune.

L'élaboration de ces cartes nécessite de combiner plusieurs jeux de données (**Figure 11**).

Les cartes de sensibilité ainsi produites sont des cartes quadrillées où la valeur de chaque cellule est déterminée par la combinaison de la sensibilité de l'espèce à l'éolien, de la concentration d'individus, et d'autres facteurs environnementaux, en particulier les statuts de conservation des espèces.



Crédits : Tris Allinson, BLECA

Figure 11 Données nécessaires à l'établissement d'une carte de sensibilité des espèces aux effets de l'éolien en mer

Les résultats de ces études peuvent donner une bonne indication des espèces les plus vulnérables pour une zone géographique donnée. La méthodologie des cartes de sensibilités

⁸ <https://avistep.birdlife.org/>

peut être répliquée dans différents contextes géographiques, néanmoins elle repose sur l'existence de jeux de données appropriés sur la répartition des espèces et les paramètres de l'enjeu nécessitent d'être définis localement.

La construction de cartes de spatialisation des risques d'effets de l'éolien, sur l'avifaune, les chiroptères et plus globalement sur l'ensemble des compartiments biologiques est un enjeu stratégique pour s'assurer que les impacts sur la faune volante sont évités partout où les enjeux écologiques sont forts.

La bonne mise en œuvre de cet outil cartographique nécessite néanmoins de disposer de données spatialisées, qui peuvent être collectées en menant des campagnes d'observation en mer ou par télémétrie. Ces données font encore largement défaut en France, et des programmes d'acquisition de connaissance sont en cours pour y remédier (présentés dans le Ch1 B)iv).

La définition de la sensibilité des espèces aux différents effets (collision, déplacement, etc.) nécessite également des jeux de données, aujourd'hui incomplets en France. Cela rend difficile l'élaboration de cartes de sensibilité véritablement robustes à ce jour.

Pourtant, lorsqu'elles sont efficacement mises en œuvre, les États peuvent, grâce aux cartes de sensibilité, procéder à une meilleure planification stratégique du développement de l'éolien en mer. Bien qu'elles ne remplacent pas les évaluations des incidences sur l'environnement propres à chaque site, ces cartes peuvent conduire à réduire considérablement les impacts en identifiant en amont les zones où les incidences négatives des parcs éoliens en mer et de l'infrastructure de réseau seront les moins importantes. Les cartes de sensibilité peuvent contribuer à accélérer les processus de planification existants, à informer et à corroborer les études d'impact environnemental une fois que les sites sont sélectionnés pour le développement (49).

B) Réduire les risques de collision et de dérangement sur l'avifaune et les chiroptères

- La minimisation des risques consiste, dès la phase de conception du parc éolien en mer, en l'adoption de choix qui réduisent ses potentiels impacts.
- Lorsque les impacts potentiels ont été minimisés par des choix préventifs effectués en amont de la construction, il s'agit de mettre tout en œuvre pour **réduire les impacts restants affectant la faune volante**. Il est possible d'agir par plusieurs biais : des actions de réduction des facteurs d'attraction, des actions d'augmentation de la visibilité et du contraste des éoliennes dans l'environnement et des actions répulsives.
- La mise à l'arrêt ou la baisse de la vitesse de rotation du rotor, qui sont appelées mesures de bridage, constituent également un levier prometteur de réduction de la mortalité liée à l'effet de collision.

i. AGIR EN AMONT EN ADAPTANT LES CARACTERISTIQUES DU PARC

La minimisation des risques consiste, dès la phase de conception du parc éolien en mer, en l'adoption de choix qui réduisent ses potentiels impacts. Plusieurs paramètres peuvent être optimisés pendant la phase de conception afin que l'empreinte du parc soit réduite, notamment ce qui relève du micro-aménagement (*micro-siting*), c'est-à-dire de la configuration du parc (disposition et espacement des éoliennes), de la taille des turbines et de la hauteur de garde (*air gap* : espace situé entre le niveau de la mer et le bas des pales).

La **disposition des turbines** peut avoir une influence importante sur le risque de collision des oiseaux ainsi que l'ampleur des effets de déplacement et barrière. Les parcs construits perpendiculairement au couloir de passage principal des oiseaux auraient un risque de collision plus élevé (115). Cette planification nécessite d'être adaptée au niveau de chaque site en fonction des cartes de sensibilité et des espèces présentes. Ainsi, dans une zone où un fort enjeu est l'effet de déplacement des plongeurs, une disposition resserrée des éoliennes pourra être choisie afin de limiter la superficie totale du parc. À l'inverse, les turbines peuvent être disposées de manière plus espacée afin d'augmenter la perméabilité du parc à des espèces qui pratiquent principalement un méso-évitement des turbines, ou encore être disposées en une ligne parallèle au couloir de migration afin de limiter l'effet barrière (110). Selon des modélisations, une disposition géométrique des turbines en quatre clusters, avec des couloirs de passage, aurait le potentiel de réduction de l'effet barrière et de l'effet collision le plus important (116). Il serait intéressant de mener davantage de recherches sur les effets de différentes dispositions géométriques et de l'effet de la distance entre les turbines comme levier de réduction du coût énergétique engendré par le contournement des parcs (16). Par exemple, une étude publiée en 2023 sur les déplacements des sternes caugek (*Thalasseus sandvicensis*) sur une zone comprenant plusieurs parcs éoliens en mer, a montré qu'elles évitent d'autant plus les parcs que l'espacement entre les turbines est réduit (117). Dans tous les cas, les choix dans le design du parc doivent être le moins impactant possible au regard des enjeux écologiques spécifiques au site envisagé.

Un second paramètre est le **ratio taille de l'éolienne/nombre d'éoliennes**. Une augmentation de la taille des turbines équivaut à une augmentation de la zone balayée par le rotor et donc de la zone où une collision risque de se produire, ainsi que de la vitesse en bout de pale qui peut également favoriser la collision. Mais en augmentant la taille des turbines, il est possible d'obtenir une production constante en diminuant le nombre de turbines et donc de diminuer la superficie totale du parc. En l'état actuel des connaissances, une seule étude, menée en Belgique, tend à montrer qu'à nombre égal de mégawatts produits, un parc constitué de moins d'éoliennes (de plus grande dimension) génère moins d'impacts négatifs (118).

Ainsi, la connaissance au sujet de ce potentiel levier de réduction des impacts est peu fournie et une étude suggère *a contrario* qu'il pourrait y avoir un effet pervers pour les chiroptères et les oiseaux migrateurs terrestres, lorsque d'anciennes turbines sont remplacées par des turbines de plus grande dimension. En effet, les turbines plus grandes sont potentiellement plus dangereuses pour les espèces volant à haute altitude (110,118).

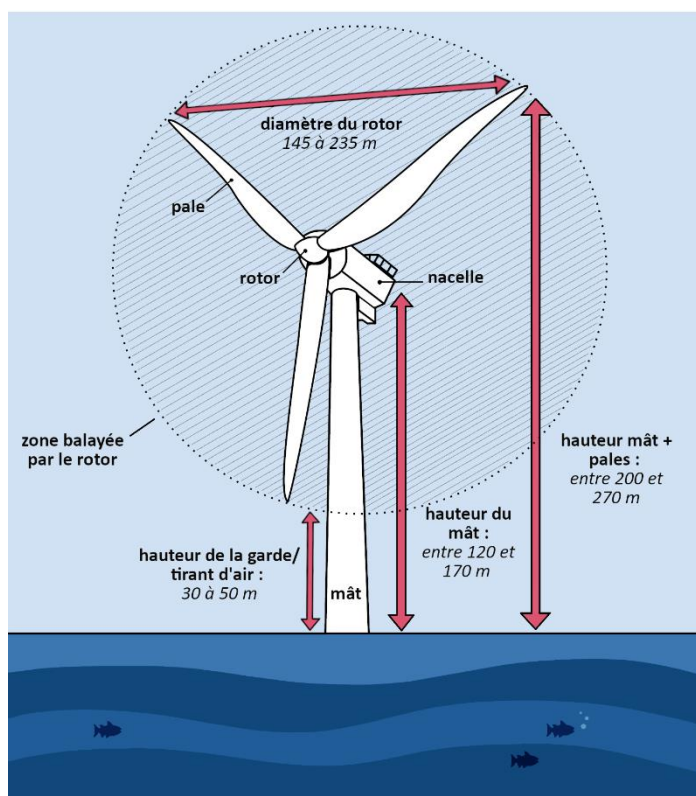


Figure 12 - Paramètres aériens liés au dimensionnement des machines pouvant influencer les risques de collision avec la faune volante.

Il est aussi possible de jouer sur le paramètre **hauteur en bas de pales, ou hauteur de garde des turbines**. Les oiseaux marins volant principalement à basse altitude, augmenter l'espace libre sous les pales en rehaussant le rotor permettrait de diminuer le risque de collision pour ces espèces. Une telle mesure de réduction (MR n°19) a par exemple été mise en place sur le projet français de Dieppe le Tréport avec une réhausse du bas de pales à 34 mètres (PHMA⁹). L'étude d'impact de ce projet conclu à une réduction du nombre de collisions par l'application de cette mesure supérieure à 50% pour la quasi-totalité des espèces. Il conviendra de confirmer ces conclusions par des données robustes de suivi pour conclure à l'efficacité de la mesure.

Le CNPN recommande dans le même temps de placer la garde basse des pales à au moins 40 mètres de la plus haute mer (PHMA).

Cependant, l'augmentation correspondante de la hauteur maximale des pales et son effet sur le risque de collision des oiseaux volant en altitude est là aussi difficile à mesurer (110).

ii. DIMINUER LES FACTEURS D'ATTRACTION ET DE DERANGEMENT DES PARCS ET ACCROITRE LA VISIBILITE DES EOLIENNES

Lorsque les impacts potentiels ont été minimisés par des choix préventifs effectués en amont de la construction, il s'agit de mettre tout en œuvre pour **réduire les impacts restants affectant la faune volante**. Il est possible d'agir par plusieurs biais : des actions de réduction des facteurs d'attraction, des actions d'augmentation de la visibilité et du contraste des éoliennes dans l'environnement et des actions répulsives. Plusieurs mesures ont été envisagées, mais **leur efficacité en conditions réelles reste à confirmer**.

Limiter la photo-attraction

L'éclairage des éoliennes a deux fonctions : permettre leur accès de nuit et leur maintenance, et assurer la sécurité aérienne et maritime grâce à un éclairage de balisage. Pour les migrateurs nocturnes, un levier important de réduction des collisions est la réduction de la photo-attraction

⁹ PHMA : plus haute mer astronomique (coef. 120)

(46). En effet, certaines espèces associent la lumière à la présence de zones de repos potentielles, si bien que le risque de collision est amplifié (119).

Deux types d'éclairage sont à évoquer :

1. L'éclairage en phase de construction et maintenance.
2. L'éclairage des éoliennes en phase d'exploitation.

L'éclairage pendant les phases de construction et de maintenance peut être un facteur d'attraction des oiseaux et augmenter les risques de collision. Il est possible de réduire cet éclairage sans compromettre la sécurité humaine, notamment en adaptant l'altitude de vols des hélicoptères de maintenance, ou en réduisant les éclairages nocturnes des structures en mer, ou encore en minimisant les travaux maritimes de nuit.

Lors de la phase d'exploitation, il convient de **réduire l'éclairage nocturne** d'un parc éolien en mer aux stricts besoins de sécurité maritime et aéronautique. Le jour, l'OFB recommande de supprimer les éclairages continus non obligatoires (120). Il a été proposé de préférer des signaux lumineux intermittents d'intensité basse et de les adapter en fonction des conditions météorologiques (17). Il y a débat sur la couleur d'éclairage à privilégier. Une solution mentionnée dans la littérature est de privilégier des lumières qui apparaissent comme vertes ou bleue. Une expérimentation sur une plateforme gazière de la mer du Nord a montré que de telles lumières pouvaient réduire d'au moins 50% les impacts sur les oiseaux migrateurs en atténuant le phénomène de vol circulaire des oiseaux autour des sources lumineuses (121). Selon d'autres sources, les couleurs rouges attirant moins les oiseaux, elles seraient à privilégier (119).

Bien que la réglementation encadre de manière assez stricte le balisage des obstacles à la navigation aérienne¹⁰, il reste possible d'opter pour des éclairages directionnels, qui ne rayonnent que dans un cône de quelques dizaines de degré d'angle. Pour les espèces de chiroptères migratrices, une piste à consolider consiste en l'utilisation de lumières infra-rouges plutôt que de lumières rouges (122).

Accroître la visibilité des éoliennes



Photo 10 - L'effet de flou de mouvement

Dans une logique contraire, envisageable en particulier en contexte diurne, un levier pourrait être de **diminuer la distance à laquelle la faune perçoit les éoliennes en augmentant leur visibilité.**

Il est possible que les oiseaux voient mal les turbines, en particulier lorsqu'elles sont en rotation, du fait de l'effet de '*motion smear*' (flou de mouvement) : la rotation rapide a pour effet optique de rendre floue et partiellement transparente la zone balayée par les pales. Accroître la visibilité des pales

des turbines et ainsi diminuer l'effet de *motion smear* pourrait permettre aux oiseaux de repérer

¹⁰ Voir notamment l'arrêté du 23 avril 2018 relatif à la réalisation du balisage des obstacles à la navigation aérienne

plus en amont la zone de danger et de l'éviter. Peindre les pales étant une solution qui, si son efficacité est prouvée, n'aurait qu'un coût marginal pour les opérateurs, il s'agit d'une piste au premier abord intéressante. Alors que les turbines sont peintes d'une couleur unie, principalement le blanc, quelques études avancent qu'un motif contrasté permet de les rendre plus identifiables.

Une étude menée sur le parc éolien terrestre situé sur les côtes de l'île de Smøla, en Norvège, a conclu que le fait que peindre en noir une pale d'éolienne réduisait fortement le nombre de collisions avec les oiseaux (123). La réduction de la mortalité annuelle par collision pour 19 espèces d'oiseaux était de 70% pour les quatre turbines peintes par rapport aux quatre turbines témoins (124). Des cas de collision avec les structures fixes ayant aussi été documentés dans ce parc, un motif de peinture sur la tour a aussi été testé, permettant de réduire de 30% les collisions à ce niveau de la turbine. Cependant l'étude souffre de nombreuses limites. La rareté des collisions et le contexte d'augmentation globale de mortalité sur le parc rendent les analyses peu robustes. Elle appelle ainsi à être répliquée pour améliorer la robustesse des résultats. Aux Pays-Bas, une étude expérimentale appliquant la même méthodologie sur un nombre plus important d'éoliennes est menée depuis 2021 dans le parc éolien côtier d'Eemshaven. Les pales de sept éoliennes du parc ont été peintes en noir et des recherches hebdomadaires de carcasses ont lieu. Les résultats ne sont pas encore publiés mais les résultats préliminaires suggèrent une efficacité moindre de ces mesures que celle annoncée dans la première étude susmentionnée (125).

Des réflexions sur la transposition de ce raisonnement dans le cas de l'éolien en mer sont menées depuis peu. Un motif achromatique à rayures pensé spécifiquement pour l'éolien en mer a été proposé par des scientifiques anglais. Ils indiquent que ce motif prend en compte les **spécificités de la vision des oiseaux marins par rapport à celle des rapaces** – les tests sur l'éolien terrestre ayant principalement visé à accroître la détectabilité des éoliennes pour ces derniers (124). Celle-ci se caractérise par une résolution moins grande, une vision frontale intermittente, et pour les goélands et les sternes un spectre chromatique qui s'étend dans les UV. Mais l'évaluation expérimentale de cette solution n'est pas encore effectuée et est rendue complexe par l'impossibilité de quantifier précisément le nombre de collisions par turbine en mer. Ces motifs sont néanmoins très similaires à ceux issus des résultats d'une thèse effectuée sur le volet



Figure 13- Proposition de motif achromatique pour accroître la visibilité des éoliennes en mer. Source : Martin and Banks, 2023

terrestre dans le cadre du projet MAPE, et présentés comme permettant une plus forte visibilité des éoliennes par les oiseaux en milieu terrestre¹¹. Davantage de recherches sur les caractéristiques de la vision des oiseaux évoluant dans le milieu marin doivent donc être menées pour garantir l'efficacité de ces mesures d'atténuation basées sur la vision.

De la même façon, **changer la couleur de la peinture des turbines pourrait permettre de réduire l'attraction des insectes, et indirectement des chiroptères** (110). Enfin, certaines peintures à rayonnement infra-rouge sont en cours de développement et permettraient aux oiseaux de mieux repérer les éoliennes de nuit (119). De plus amples recherches doivent être menées pour pouvoir formuler des recommandations à ce propos.

Un autre volet de mesures fréquemment envisagées consiste en la mise en place de dispositifs ou d'adaptation des turbines qui réduisent leur attractivité pour les espèces qui y sont sujettes et permettent ainsi de diminuer leurs risques de collision.

Dispositifs anti-reposoir

Les cormorans et, parfois, des goélands, notamment lors de la phase de construction, utilisent les bases de support des turbines comme reposoirs. Certaines espèces de laridés et passériformes semblent utiliser également les flotteurs des éoliennes dites « flottantes » (9). Ce stationnement favorisé dans le périmètre du parc, bien que générant de possibles effets positifs pourrait en contrepartie augmenter leur risque de collision avec les pales des éoliennes, lors de leur atterrissage ou décollage (126).

Si ce risque est confirmé, des recherches doivent être menées pour déterminer comment l'effet reposoir contribue aux risques de collision, afin de mettre en place des dispositifs anti-reposoir efficaces. L'installation de leurres sur les structures ainsi que de dispositifs anti-perchage peut en effet empêcher le stationnement des oiseaux (110).

Cependant, il y a aussi le risque que les leurres suscitent la curiosité d'oiseaux et augmentent leur risque de collision. **À ce jour, l'absence d'expérimentation de ces dispositifs de neutralisation des perchoirs ne permet pas de dire si ces solutions pourraient avoir un impact global positif.**

¹¹ Thèse relative à la perception visuelle des éoliennes par les oiseaux, soutenue par Constance Blary le 08 décembre 2023, dans le cadre du projet MAPE du CEFE CNRS.

Pour l'éolien flottant spécifiquement il s'agira de la même façon de déduire de ces recherches le type de flotteur le moins impactant (41). Plusieurs modèles existent d'ores et déjà. (**Figure 14**).

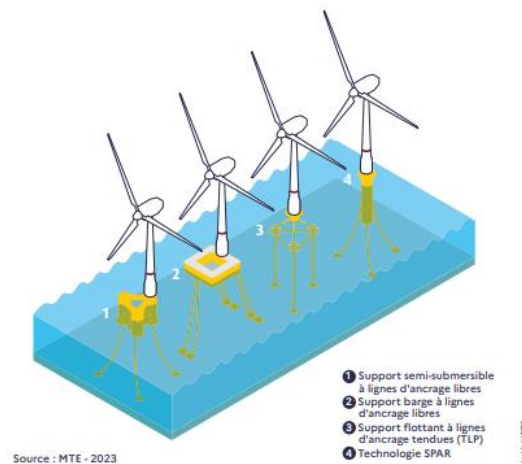


Figure 14 - Types de flotteurs et d'ancrages pour l'éolien flottant. Source : MTE, 2023.

Effarouchement

Parallèlement, afin de réduire les risques de collision, une mesure envisagée consiste à repousser les oiseaux hors de la zone du parc éolien. On trouve dans la littérature la mention de dispositifs d'effarouchement sonore, visuel, par laser, ou encore par ultra-son (aussi appelés Bird Deterrent System – BDS) (110,127). De manière générale, si ces techniques peuvent être intéressantes, se pose en contrepartie la problématique du dérangement des espèces. La réduction éventuelle du risque de collision est en toute hypothèse à mettre en balance avec le dérangement et éventuellement la perte d'habitat. De plus, les oiseaux effarouchés sont susceptibles d'être ceux qui ont de toute façon une réaction d'évitement par rapport aux éoliennes et donc sont moins sujets aux collisions que ceux qui ne sont pas effarouchés.

De même, il est mentionné plus avant dans cette synthèse une tendance à l'augmentation des risques de collisions en conditions météorologiques difficiles. L'efficacité de ces systèmes n'ayant pas été testée dans de telles conditions (a fortiori dans le milieu marin), il est permis de questionner sur ce point l'efficacité de tels systèmes pour réduire significativement les risques de collisions.

Par ailleurs, une large majorité des espèces d'oiseaux et de chiroptères fréquentant le milieu marin fait l'objet d'un classement en espèces protégées. La perturbation intentionnelle ou le déplacement de telles espèces est donc soumis à l'obtention d'une dérogation¹².

Ces mesures sont en toute hypothèse à mettre en œuvre dans le cadre d'un plan global de gestion du site. La présence des espèces dans ces périmètres est liée à la fonctionnalité de ces zones (alimentation, repos, tracé migratoire). Le report sur d'autres zones adjacentes de qualité et caractéristiques équivalentes n'étant pas toujours assuré, le bénéfice de l'évitement de ces zones pour la survie des individus concernés n'est pas certain.

¹² Le principe de protection des espèces et de l'interdiction de destruction des spécimens sont édictées à l'article L411-1 du code de l'environnement.

Au-delà de ces réflexions générales, nous examinons ci-après la spécificité de certaines techniques d'effarouchement.

L'effarouchement sonore par diffusion de sons présente plusieurs défis. Premièrement, les sons audibles par l'homme ne le sont pas nécessairement par les oiseaux, qui ont un spectre d'audition plus réduit que les humains et il convient ainsi d'utiliser les fréquences adaptées aux espèces cibles (110). Deuxièmement, se pose la question de l'habituation plus ou moins rapide des oiseaux et chauves-souris à ces signaux sonores, rendant à plus ou moins long terme ces techniques inefficaces (128). Il s'agirait alors de réussir à avoir des émissions sonores suffisamment rares et diversifiées pour limiter l'habituation. En l'état actuel des recherches, il est ainsi admis que les techniques d'effarouchement sonore ne peuvent prétendre être une solution durable (129).

L'effarouchement visuel présente possiblement moins d'inconvénients mais son efficacité n'est pas prouvée dans le contexte de l'éolien en mer. L'utilisation de lasers pour pousser les cormorans à abandonner leurs perchoirs semble relativement efficace pour éloigner les individus des zones à risques, en conditions météorologiques normales. L'efficacité de ces systèmes en matière de réduction de l'ensemble des impacts sur cette espèce (dérangement, perte d'habitat, risque d'échec de nidification, etc.) n'est néanmoins pas connue à ce jour.

Concernant les chiroptères spécifiquement, des techniques pour les repousser hors des parcs par diffusion d'ultrasons ou d'ultraviolets sont en développement mais ne sont pas encore opérationnelles (130).

Pour les oiseaux migrateurs terrestres, le risque d'habituation apparaît moindre, étant donné qu'ils ne fréquentent l'espace maritime qu'une partie de l'année, et la mise en place de dispositifs d'effarouchement pourrait être préconisée au cas par cas, en fonction des enjeux avifaunistiques présents sur le site du parc.

Ces techniques, qui ont été jusqu'à présent très peu testées en condition réelles, doivent ainsi faire l'objet de davantage de recherches (127).

Réduire le dérangement

Si les mesures susmentionnées peuvent permettre de réduire l'effet collision, elles peuvent aussi potentiellement avoir un effet pervers sur les espèces impactées principalement par la perte d'habitat fonctionnel (124). Pour réduire l'effet de déplacement, étant donné que d'autres activités anthropiques viennent s'ajouter aux nuisances causées par l'éolien en mer, il est possible d'agir sur les autres facteurs de dérangement. En phase de maintenance du parc par exemple, il s'agit de veiller à ce que les opérations de maintenance aient lieu lorsque les oiseaux sont le moins susceptibles d'être dérangés (60).

iii. DIMINUER LA MORTALITE A L'AIDE DE SYSTEMES DE BRIDAGE DES EOLIENNES

La mise à l'arrêt ou la baisse de la vitesse de rotation du rotor, qui sont appelées mesures de bridage, constituent également un potentiel levier de réduction de la mortalité liée à l'effet de collision. La baisse de la vitesse des pales peut, dans une certaine mesure permettre d'augmenter leur visibilité et réduit mécaniquement le risque de collision d'un oiseau traversant la zone balayée. Les recherches sur l'éolien terrestre montrent à ce jour que le bridage des turbines, c'est-à-dire leur arrêt ou baisse d'activité ponctuelle, peut réduire significativement la mortalité projetée tout en ayant un impact limité sur la production énergétique (131,132).

Une première possibilité est d'arrêter les turbines seulement lorsque des oiseaux sont détectés volant à proximité, on parle alors de **bridage à détection automatique** d'oiseaux ou chiroptères, ou **bridage dynamique**. La seconde modalité est celle d'un **bridage statique**, qui consiste en l'arrêt de la rotation prédéfini selon des paramètres fixés à l'avance, en particulier sur les périodes à risque pour les oiseaux.

La détection en temps réel par radar des oiseaux en vol permet de déclencher l'arrêt des turbines ou la réduction de la vitesse de rotation des pales au moment opportun. Des technologies en cours de commercialisation, comme XBird Radar® de la société française Biodiv-Wind, annoncent pouvoir détecter et identifier la faune volante et réduire le risque de collisions en diminuant la vitesse du rotor. Il existe aussi des systèmes développés pour l'éolien terrestre, comme Chirotech®, qui ralentissent la rotation des éoliennes en période de forte activité des chauves-souris. S'il est à peu près certain qu'une réduction de la vitesse diminuerait le risque de barotraumatisme pour les chiroptères, l'ampleur du potentiel de réduction de l'effet collision pour les oiseaux n'est pas établi (110). Dans ces stratégies de bridage, il faut déterminer un seuil de fréquentation de la zone par les oiseaux qui déclenche automatiquement la mise à l'arrêt ou la baisse de l'activité.

Des recherches portent aussi sur l'utilisation de la télémétrie pour que l'arrêt des turbines soit enclenché lorsque la balise GPS d'un oiseau d'une espèce à fort enjeu de conservation est en approche d'une turbine (133). Des mesures de bridage ont déjà été mises en œuvre avec succès dans plusieurs parcs éoliens terrestres, en particulier pour protéger les rapaces, entraînant une réduction de la production énergétique marginale (<1%) (131). L'efficacité et l'évaluation coût-bénéfice des dispositifs automatiques d'arrêt des pales par détection des oiseaux n'est pas encore établie pour les éoliennes marines. De plus, se pose la question de la pression sur les machines, ces dispositifs d'arrêt à détection d'oiseaux pouvant les abîmer et raccourcir leur durée de vie, avec un effet environnemental difficile à calculer (134). De récentes recherches révèlent qu'il est possible de réduire sensiblement les collisions de rapaces, sans arrêter totalement les pales, ce qui est meilleur pour la durabilité des matériaux (135). Globalement, la maritimisation de ces mesures de bridage développées pour l'éolien terrestre comme approche de minimisation des risques demande davantage de recherches empiriques (56,127).

Pour les chiroptères, l'influence de la direction et de la vitesse du vent, restent à analyser plus avant. En milieu terrestre, la plupart des décès de chauves-souris surviennent à des vitesses de vent faibles. Il a été démontré que l'augmentation de la vitesse d'enclenchement, c'est-à-dire la vitesse du vent à laquelle l'éolienne commence à produire de l'énergie, réduisait

considérablement la mortalité des chauves-souris, de 50 à 87 % sur les sites pour une vitesse d'enclenchement comprise entre 5 et 6 m/s contre 3 à 4 m/s habituellement (136,137). En milieu maritime, reste à évaluer si cette mesure aurait un effet bénéfique sur les chiroptères, étant donné, notamment, que les vents sont plus constants.

Une modalité présentée comme particulièrement efficace dans le cas de l'éolien terrestre est le **bridage statique**, prenant en compte la saisonnalité de la sensibilité des espèces. De nombreuses études relèvent l'intérêt potentiel d'un bridage ponctuel lorsque les risques de collision sont particulièrement forts (127) : période de migration (129,138) ou de conditions de visibilité réduite (17,139). Il apparaît que cette mesure, à la suite de tests effectués en Europe, aux Etats-Unis et Australie, permet aussi de réduire la mortalité des chiroptères (140-142). Une stratégie de bridage a déjà été mise en place dans le cas de parcs éoliens situés dans des goulots d'étranglement des couloirs de migration, pendant la période de fort passage migratoire. Dans l'Union Européenne, il est désormais légalement requis de brider les éoliennes terrestres pendant les périodes de forte activité des chauves-souris (142). Pour les oiseaux utilisant le milieu marin, des modèles ont été créés afin de déterminer les périodes optimales pour brider les éoliennes en fonction des espèces cibles et des coûts engendrés pour un site donné, notamment le projet de parc en mer Cape Wind aux Etats-Unis vis-à-vis des risques de collision du Plongeon imbrin (*Gavia immer*) (143).

L'élaboration d'un plan de bridage à partir de la prévision écologique à court-terme de la sensibilité des espèces est une solution qui, dans l'avenir, pourrait permettre d'optimiser les périodes de bridage (144). Pour limiter l'impact des parcs éoliens en mer sur les oiseaux migrateurs, en particulier nocturnes, des solutions de bridage dynamique (*smart curtailment*) sont étudiées. En 2021, des scientifiques néerlandais ont suggéré une mise à l'arrêt des turbines du parc de Borseele quand le seuil de 500 oiseaux/km/heure à hauteur de rotor est franchi (138). Ils ont conçu un modèle de prédiction à court-terme de l'intensité migratoire nocturne et comparé les résultats aux données obtenues par radar. Le modèle utilise le calendrier de migration et des données météorologiques, pour prévoir le plus finement possible les flux de migration nocturne. Les scientifiques ont calculé que si le seuil qu'ils ont proposé est respecté, cela équivaldrait à une mise à l'arrêt des turbines moins de 40 heures par an, avec une perte de production énergétique annuelle inférieure à 1% (145). Cette étude de la saisonnalité des flux de migration a abouti, en mai 2023, à la mise à l'arrêt pendant 4 heures des parcs éoliens marins de Borseele et Egmond aan Zee, aux Pays-Bas. Il s'agissait d'une première mondiale et le bridage temporaire pendant le pic de la période de migration y est depuis devenu une norme réglementaire (146). Si cette mesure permet d'éviter un nombre significatif de collisions pour un nombre d'heures d'arrêt limité, le choix du seuil devra être guidé principalement par les enjeux de maintien d'un bon état de conservation des populations d'oiseaux.

En France, le projet SEMAFOR d'observatoire en temps réel des oiseaux migrateurs sur le territoire national terrestre et marin se concentre notamment sur l'utilisation des radars météorologiques pour prédire les pics de passage migratoire de l'avifaune en mer. À terme, en 2025, il est prévu la livraison d'un algorithme de détection de l'avifaune et une carte de probabilité de passage des oiseaux migrateurs sur les façades maritimes à partir de modèles prédictifs (147).

C) La difficulté de compenser les impacts résiduels sur l'avifaune et les chiroptères

- **On ne sait pas aujourd'hui compenser en mer la mortalité d'un individu par collision ou la perte d'habitat.** De nombreuses mesures de compensation devraient ainsi aujourd'hui être considérées à ce stade de la connaissance comme des mesures d'accompagnement et non de compensation (au sens de la loi).
- Il est ainsi essentiel de **mettre en œuvre, en parallèle**, la protection effective du milieu marin via un **réseau d'aires marines protégées, où les principales pressions anthropiques sont effectivement supprimées ou réduites drastiquement.**

Selon la logique de la séquence ERC, les impacts résiduels, c'est-à-dire les impacts qui n'ont pu être évités et réduits, doivent faire l'objet de mesures de compensation.

La compensation en mer présente de nombreux défis et la transposition d'un principe de droit conçu d'abord pour être appliqué en milieu terrestre, est loin d'être évidente, car **on ne sait pas aujourd'hui compenser en mer la mortalité d'un individu par collision ou la perte d'habitat (au sens légal du terme « mesure de compensation »)** (120). Certaines espèces sont inféodées au milieu dans lequel elles évoluent. Ainsi, les solutions qui visent le report sur d'autres zones ou l'augmentation de la taille de population adjacente, ne peuvent pas garantir le maintien dans un état de conservation favorable des espèces présentes sur le site de chaque parc éolien. Dans le même sens, le Conseil National pour la Protection de la Nature (CNP) dans son auto-saisine de 2021 sur le développement de l'énergie offshore en France et ses impacts sur la biodiversité, le patrimoine naturel et les paysages, estime que : *« On ne peut pas compenser la perte d'habitat causée par la disparition des zones d'alimentation pour les oiseaux locaux (nicheurs ou hivernants) et encore moins pour les migrateurs provenant de l'Europe entière »* (51).

Dans le cas des impacts sur la faune volante des projets d'éolien en mer, plusieurs mesures dites de compensation ont été suggérées et testées dans différents pays européens. On présente quelques-unes de ces mesures, qu'il conviendrait de considérer à ce stade de la connaissance comme des mesures d'accompagnement et non de compensation (i.).

Le droit de l'environnement **prévoit que la « compensation » soit pensée au niveau de la planification maritime à l'échelle des façades ou biogéographique.** En effet, la directive européenne du 27 juin 2001 pose le principe que les « plans et programmes susceptibles d'avoir des incidences notables sur l'environnement soient soumis à une évaluation environnementale » préalablement à leur adoption (art. 1er – Objectifs). Cette évaluation environnementale a pour objectif d'identifier les enjeux environnementaux et les principaux impacts cumulés de projets potentiels, pour qu'ils soient pris en compte de façon anticipée. Ces documents doivent ainsi dérouler la séquence ERC (mesures d'évitement, de réduction et de compensation).

Si l'on souhaite adopter une approche écosystémique, la compensation des impacts de l'éolien en mer, qui s'additionnent à ceux d'autres activités anthropiques, doit être construite dès le stade de la planification, en lien avec les impacts de même nature sur les espèces. C'est ce que nous désignons ici sous le terme de **compensation stratégique.** Indépendamment du développement de l'éolien en mer, des actions devraient alors être mises en œuvre pour restaurer et améliorer

l'état écologique du milieu marin¹³. Dans une deuxième section, sont présentées quelques pistes de réflexion sur des mesures à envisager pour réduire la somme des pressions exercées sur ces espèces, et ainsi rendre supportable pour ces dernières, l'impact et la mortalité additionnelle engendrés par le développement de l'éolien en mer (ii.).

i. REMPLACEMENT D'HABITAT FONCTIONNEL : DES MESURES D'ACCOMPAGNEMENT A ENVISAGER POUR FAVORISER L'ATTEINTE DU BON ETAT ECOLOGIQUE

L'exploitation de parcs éoliens en mer ayant pour effet de réduire les zones d'alimentation de plusieurs espèces, ainsi que de limiter leur succès reproducteur, un ensemble de mesures testées actuellement consiste à restaurer des espaces pour substituer l'habitat fonctionnel perdu. Lorsqu'il est possible d'identifier quelles sont les colonies d'oiseaux nicheurs qui sont impactées par un parc éolien, des actions ciblées sur cette population peuvent être prioritairement mises en œuvre. Dans le cas de l'éolien terrestre, les actions compensatoires consistent majoritairement en la création ou restauration d'habitat, le contrôle des prédateurs, l'élimination des espèces exotiques/invasives, la réintroduction d'espèces et la complémentation de l'alimentation (115). Quelques exemples de projets identifiés comme potentiellement prometteurs pour améliorer l'état de conservation des oiseaux marins sur les îles anglaises incluent : la création de plateformes de nidification pour les plongeurs, l'éradication des mammifères prédateurs sur les îles où nidifient les puffins des Anglais, ou encore la complémentation de l'alimentation des Labbes parasites (*Stercorarius parasiticus*) (148). Au Royaume-Uni, dans le cadre du programme EcoWind¹⁴, le bénéfice pour différentes espèces d'oiseaux marins de 14 potentielles mesures compensatoires a été évalué par un collègue d'experts. Les actions préconisées dépendent fortement de l'espèce et vont de la gestion des prédateurs à la réduction de la pollution marine. Ils notent que la question reste ouverte quant à de possibles conflits entre les différentes mesures. Une hiérarchie est proposée : les actions avec un fort lien entre impact et mesure de compensation doivent être privilégiées (149). En clair, les actions visant la population impactée sur son site de distribution sont à privilégier sur celles visant la même espèce mais une autre population.

Cependant, du fait de l'impossibilité de quantifier les impacts réels sur la faune volante, ces mesures ne peuvent prétendre pallier les impacts réels d'un projet et ainsi garantir une absence de perte nette de biodiversité. De plus, la surmortalité des populations d'oiseaux et chiroptères liée à l'éolien en mer ne peut être compensée directement, et **il est complexe de s'assurer que le principe d'équivalence écologique est respecté par les mesures de compensation indirectes proposées** (150).

Le contrôle des prédateurs est une mesure de conservation des espèces d'oiseaux nicheurs relativement commune, en particulier en contexte insulaire, où les rats, ou d'autres prédateurs introduits, peuvent contribuer fortement à la mortalité des juvéniles (110). L'éradication des prédateurs associée à la gestion des habitats mène souvent à une rapide recolonisation par les oiseaux marins des zones d'habitat, de sorte que leur réintroduction n'a pas besoin d'être dirigée (110). À ce jour, très peu de projets de conservation des habitats et des espèces ont été

¹³ Rejoignant ainsi l'agenda d'action « nature positive » de gain net pour la nature.

¹⁴ <https://ecowind.uk/>

effectivement mis en œuvre dans le cadre d'un programme de compensation pour l'éolien en mer. En effet, les impacts sur les populations étant insuffisamment caractérisés, il n'en découle pas d'obligation juridique à mettre en œuvre des actions. En France, les mesures de compensation associées au parc de Saint Nazaire incluent des actions de préservation des îlots utilisés comme site de nidification par le Goéland marin et le Puffin des Baléares. Les premières actions de dératissage sur des sites de nidification des goélands marins ont été menées en 2022 (151). Il est trop tôt pour conclure quant à un potentiel bénéfice de ces actions sur les populations d'oiseaux impactées par ce parc éolien.

Les actions portant sur les sites de nidification ont généralement deux objectifs : augmenter la capacité d'accueil et améliorer le succès reproducteur. Or, comme le souligne le CNPN dans son auto-saisine, ces actions soulèvent des questions : « augmenter le nombre de couples sur un site qui généralement est situé dans la zone d'influence du parc peut entraîner un risque accru de collision, et surtout cette éventuelle augmentation du nombre de jeunes oiseaux produits (souvent illusoire car régi par les ressources alimentaires limitées) ne compense pas une surmortalité d'adultes, leur survie représentant chez les espèces longévives un facteur 10 fois plus important pour la dynamique de population que la production de jeunes. » (51)

Pour que ces mesures aient un réel bénéfice, le séquençage temporel de leur mise en place est crucial et elles devraient obligatoirement être initiées en amont de la construction du parc éolien afin d'être effectives dès le début des atteintes. Au Royaume-Uni, pour la première fois en 2020, les autorisations environnementales de quatre nouveaux parcs ont requis que des actions de compensation soient mises en place quatre ans avant la mise en service des parcs. Du fait du cumul d'impact, pour obtenir une autorisation environnementale, les opérateurs ont dû proposer des plans pour compenser la mortalité excédant le seuil jugé acceptable pour deux espèces : la Mouette tridactyle et le Goéland brun. Pour le Goéland brun, le plan de compensation a consisté en l'installation d'un grillage de protection autour des sites de nidification pour empêcher l'intrusion de renards, prédateurs de premier ordre des nids d'oiseaux. Pour la Mouette tridactyle, il a été choisi d'augmenter la productivité de l'espèce en créant de nouveaux sites de nidification, à travers l'aménagement de quatre tours de nidification artificielles (**Photo 11**) (152).



Photo 11 L'« hôtel » à mouettes sur le port de Lowestoft (UK)

Des associations de protection de la nature, dont la RSPB, ont critiqué ce choix, jugeant l'efficacité de ces mesures trop incertaine et la temporalité des bénéfices attendus, dans dix ans, inadéquate avec le calendrier de mise en service du parc (153). Pour faire état de la difficulté à

compenser la mort d'un adulte d'une espèce longévive, les développeurs du projet se basent sur un facteur d'1 sur 10 : pour 35 décès projetés, ils annoncent favoriser la création de 400 nids (154). Cependant, à la suite de l'installation de ces aménagements, les mouettes n'ont à ce stade, en novembre 2023, pas colonisé les structures. Des mesures de gestion adaptatives doivent être mises en œuvre afin d'inciter les mouettes à y nidifier. Cet exemple est révélateur des fortes incertitudes inhérentes à la mise en œuvre de mesures dites « de compensation ».

Des projets de compensation par réduction des captures accidentelles d'oiseaux marins sont aussi envisagés, en particulier au Royaume-Uni. Dans la Manche, une bouée d'effarouchement, est actuellement testée par une vingtaine de pêcheurs dans le cadre d'un programme de compensation du parc éolien en mer Hornsea Project Three. Les tests réalisés sur ce dispositif ailleurs en Europe et pour différentes espèces indiquent des résultats contrastés, avec une efficacité potentielle pour réduire les captures de Haralde boréal (*Clangula hyemalis*) en Lituanie (155) ou une absence d'efficacité sur l'Eider à duvet et le guillemot en Islande (156). Dans la plupart des cas, les dispositifs de réduction des captures accidentelles sont encore expérimentaux, aucun dispositif ne peut être considéré comme efficace a priori et leur efficacité doit être testée et évaluée localement (157).

ii. FACE AUX IMPACTS CUMULES, L'IMPERATIF DE PENSER EN TERMES DE COMPENSATION STRATEGIQUE

Plutôt que de traiter indépendamment les impacts spécifiques de l'éolien en mer, on peut envisager la compensation des impacts cumulés de l'ensemble des pressions anthropiques sur les oiseaux et chiroptères dans une perspective d'amélioration du bon état écologique marin.

La compensation stratégique est une approche intégrative des enjeux écologiques qui se distingue de celle de la compensation mutualisée seule¹⁵ et plus globalement de l'idée d'une compensation par l'offre. Cette dernière n'existe pas encore en contexte maritime, et l'idée une transposition en mer de la logique des sites naturels de compensation (SNC) présente d'importants défis institutionnels¹⁶ (158). S'il s'agit dans ces différentes propositions de repenser pour partie le cadre institutionnel de la planification maritime, la **compensation stratégique** a, elle, pour horizon l'atteinte du bon état écologique du milieu marin.

Dans cette perspective, il devrait être possible d'agir sur d'autres facteurs de pressions liés aux activités en mer. Les leviers, au-delà des mesures d'accompagnement aux mesures ERC des projets d'éolien en mer, pourraient notamment concerner : la réduction des pressions issues de la pêche, la lutte contre les espèces non indigènes sur les sites de reproductions (présentée ci-dessus) ou encore la restauration d'habitats naturels et le dérangement en mer ou sur le littoral. Par ailleurs, la fonctionnalité des écosystèmes littoraux tient dans une interrelation étroite entre la terre et la mer. L'atténuation des pollutions d'origine continentale qui ont un impact négatif

¹⁵ La compensation mutualisée désigne la mise en œuvre d'une mesure compensatoire au travers d'un programme commun pour plusieurs projets différents.

¹⁶ Les premières banques de compensation en mer ont vu le jour aux Etats-Unis dès 1985. En France, il existe un système émergent de compensation par l'offre pour des projets ayant des incidences sur le milieu terrestre, système de compensation qui se matérialise par la création de sites naturels de compensation dont les opérateurs peuvent acheter des unités de compensation.

indirect sur les oiseaux marins au travers des atteintes sur leurs ressources alimentaires, est donc un levier d'action complémentaire et indispensable (3).

À l'échelle mondiale, les captures accidentelles liées à la pêche sont la première menace affectant les oiseaux marins en nombre d'individus affectés, et la deuxième en nombre d'espèces (3). En Europe, il est estimé que plusieurs centaines de milliers d'individus capturés accidentellement chaque année rien que dans les filets maillants (159). L'identification de mesures permettant de réduire les captures accidentelles est donc une mesure pivot pour améliorer l'état de conservation de ces espèces. De plus, la croissance de nombreuses populations d'espèces d'oiseaux est limitée par le manque de nourriture dû à la prédation humaine sur les mêmes types de proie. Le fait que les effectifs reproducteurs des oiseaux marins sont particulièrement affectés par l'abondance de la nourriture est largement établi (3,148,160). Là où la compétition trophique affecte les populations d'oiseaux marins, une limitation de la pression de pêche serait donc bénéfique à l'état des populations. Au Royaume-Uni, un comité d'expert invité à hiérarchiser l'efficacité de possibles mesures de compensation a placé en première position les mesures de limitation de la pêche de lançons et de sprats. Une réduction de la pression de pêche permettrait, selon eux, d'accroître les populations de Guillemot de Troïl, Pingouin torda et Mouette tridactyle (148). Cette approche par la compensation stratégique permet d'appréhender de manière plus intégrative la protection de l'avifaune marine.

En matière de réduction du dérangement et restauration d'habitats naturels, pour les chiroptères, les potentielles mesures de compensation qui sont proposées dans le cas de l'éolien terrestre vont de la gestion des forêts anciennes, à la préservation des dortoirs et création de nouveaux dortoirs, ainsi que de mares, la présence de point d'eau douce étant un facteur limitant l'accroissement des colonies (161). Mais l'effectivité de ces mesures sur les populations de chauves-souris migratrices potentiellement affectées par le développement de l'éolien en mer reste à prouver. Les effectifs de chiroptères déclinent pour partie du fait des pressions sur leurs gîtes et zones de chasse, c'est donc à ce niveau qu'il convient d'agir. En France, dans le cadre du projet éolien de Saint Nazaire, des mesures de plus-value écologique favorables aux populations chauves-souris pouvant être impactées sont mises en œuvre. Elles prennent la forme d'un programme de communication auprès des populations littorales et des collectivités et d'actions visant à favoriser l'accès au bâti des chauves-souris, ainsi qu'en faveur de la sauvegarde des zones humides et boisées (162).

Enfin, pour le dérangement en mer, il peut être intéressant de diminuer le dérangement lié au trafic maritime, notamment pour les plongeurs, par la mise en place de réglementations plus contraignantes (bruit, vitesse, itinéraire) (60).

Ainsi, aux cartes des pressions anthropiques combinées aux cartes de sensibilité des espèces et à des cartes de risques intégrées (présentées dans le A), pourraient correspondre des plans de compensation stratégique. C'est par exemple l'ambition du programme Offshore Wind Evidence and Change (OWEC) au Royaume-Uni. L'objectif d'avoir un impact positif net sur la biodiversité doit être la ligne d'horizon de l'ensemble des activités maritimes. Ce concept recèle de nombreux défis - certains spécifiques à l'éolien en mer et d'autres communs à la gestion et à l'atténuation des impacts sur la biodiversité en général - mais doit guider l'action, car l'amélioration de l'état des écosystèmes marins est une priorité tant en matière de biodiversité que de changement climatique. L'atteinte d'une absence de perte nette, voire d'un gain de biodiversité est bien une obligation légale qui concerne à valeur égale la planification maritime, la séquence ERC étant applicable aux plans/programmes (Loi du 08 août 2016 pour la reconquête de la biodiversité).

Conclusion

En conclusion, les impacts potentiels de l'éolien en mer sur la faune volante sont nombreux et d'intensité variable. Trois principaux effets ont été présentés dans cette synthèse.

L'**effet collision** entraîne une mortalité directe : il est impossible à mesurer directement à ce jour et est complexe à modéliser. Les ordres de grandeur estimés du nombre de collisions indiquent que celui-ci dépend de nombreux paramètres ; il pourrait être néanmoins important (plusieurs dizaines de collisions par turbine et par an) et majoré par des pics de mortalité dont la fréquence pourrait augmenter sensiblement avec les changements climatiques. L'impact démographique de cet effet est difficile à caractériser. Pour des espèces longévives en mauvais état de conservation, l'impact pourrait être significatif dès qu'un très faible pourcentage des populations est touché et mettre en danger la survie de ces espèces, par exemple le Puffin des Baléares (51).

Certaines espèces d'oiseaux, en particulier de la famille des *Alcidae*, *Sulidae* et des *Gaviidae*, réduisent significativement leur activité dans et autour des zones des parcs éoliens en mer. Cet **effet déplacement** induit une perte d'habitat fonctionnel qui peut être importante, en particulier dans les zones où sont concentrés plusieurs parcs. L'**effet barrière** affecte les espèces d'oiseaux marins nicheurs qui effectuent de fréquents allers-retours en mer pendant la période de reproduction, ainsi que les oiseaux migrateurs pour lesquels les parcs éoliens peuvent se présenter comme des obstacles récurrents sur leurs voies migratoires. S'il est difficile de calculer la mortalité additionnelle générée par ces effets, il est crucial de considérer leur dimension cumulative. Il apparaît ainsi que la multiplication de parcs éoliens en mer pourrait générer une mortalité additionnelle avec des impacts démographiques sur les populations d'oiseaux qui ne peuvent pas être exclus en l'état des connaissances actuelles.

Les connaissances sur les impacts sur les chiroptères sont encore limitées. Il apparaît cependant que **plusieurs espèces de chauves-souris lorsqu'elles se déplacent en mer, sont concernées par l'effet collision, ainsi que susceptibles d'être victimes de barotraumatismes.**

La **sous-estimation des impacts cumulés des projets** est facteur de grandes incertitudes sur les impacts à moyen et long terme sur les populations d'oiseaux et de chiroptères affectées par les effets de collision, déplacement et barrière engendrés par l'éolien en mer.

Cette synthèse de littérature souligne ainsi le **besoin de collecter des données sur la répartition en mer et la sensibilité des espèces fréquentant les eaux nationales et de les cartographier**. Il y a aussi nécessité **d'établir des protocoles et méthodes standardisés pour les inventaires et suivis de mortalité**, ainsi que la collecte de données sur le comportement en vol. Le référentiel technique de l'OFB sur les interactions entre les projets d'éoliennes en mer et le milieu marin, publié en décembre 2023, propose des fiches mesures, notamment sur le suivi de l'avifaune et des chiroptères en phase d'exploitation (120).

Selon les connaissances actuelles, le levier le plus important pour limiter les impacts de l'éolien en mer est celui de l'évitement des zones sensibles. Si des moyens de réduction des impacts

peuvent ensuite être envisagés, il est en l'état difficile de se prononcer sur l'efficacité de la plupart des dispositifs mentionnés dans une littérature qui reste mince. **Sur la base des connaissances scientifiques actuelles, la définition des mesures compensatoires pour l'éolien en mer est peu stabilisée.** Des mesures de restauration passive, c'est-à-dire de diminution des pressions sur le milieu marin, pensées au niveau d'une planification maritime, pourraient avoir une efficacité écologique plus grande que des actions d'ingénierie écologique.



Photo 12 – Guillemot de Troil

TABLE DES FIGURES

Figure 1 Cartographie des parcs éoliens en mer français actuels Source : https://www.energiesdelamer.eu/2022/04/30/carte-des-emr/	9
Figure 2 – Vue d’ensemble des incidences des EMR sur l’environnement. Source : Cour des Comptes Européennes sur la base d’une analyse bibliographique, 2023, p. 38.....	10
Figure 3 - Présentation des principales données d’entrée des modèles CRM	15
Figure 4 Illustration des types de comportement des oiseaux d’évitement des éoliennes.....	17
Figure 5 Présentation de la méthode BACI, schéma de BirdLife International.....	24
Figure 6 - Définitions adaptées de Boehlert & Gill 2010.....	34
Figure 7 - Cadre méthodologique des échelles de prise en compte des effets environnementaux, issu du référentiel technique de l’Office Français de la Biodiversité (OFB) sur l’éolien en mer (2023), adapté de Boehlert & Gill 2010 (80).	34
Figure 8 Distribution modélisée des plongeurs (individus par km ²) avant et après la construction des parcs éoliens, combinée pour les cinq groupes de parcs éoliens. Crédits : Garthe et al. 2023.	36
Figure 9 Vulnérabilité annuelle combinée de trois colonies, représentée à la fois par la sensibilité et la vulnérabilité des colonies individuelles (ligne du haut) et au niveau de la "population", en pondérant les surfaces (ligne du bas) par la taille globale de la population de chaque colonie. Crédits : Thaxter et al. 2019.....	38
Figure 10 - Le cycle biologique des chiroptères.....	41
Figure 11 Données nécessaires à l’établissement d’une carte de sensibilité des espèces aux effets de l’éolien en mer.....	47
Figure 12 - Paramètres aériens liés au dimensionnement des machines pouvant influencer les risques de collision avec la faune volante.....	50
Figure 13- Proposition de motif achromatique pour accroître la visibilité des éoliennes en mer. Source : Martin and Banks, 2023	52
Figure 14 - Types de flotteurs et d’ancrages pour l’éolien flottant. Source : MTE, 2023.....	54

Bibliographie

1. UICN Comité français. Planification des projets éoliens en mer. 7 recommandations stratégiques pour une prise en compte de la biodiversité dans l'évaluation environnementale. [Internet]. 2023 [cité 6 sept 2023]. Disponible sur: https://www.cambridge.org/core/product/identifier/9781009157926%23pre2/type/book_part
2. Gaultier SP, Marx G. Éoliennes et biodiversité: synthèse des connaissances sur les impacts et les moyens de les atténuer [Internet]. Office national de la chasse et de la faune sauvage - ONCFS, Ligue pour la protection des oiseaux - LPO; 2019 sept p. 120. Disponible sur: https://professionnels.ofb.fr/sites/default/files/pdf/documentation/Synthese2019_EoliennesBiodiversite.pdf
3. Dias MP, Martin R, Pearmain EJ, Burfield IJ, Small C, Phillips RA, et al. Threats to seabirds: A global assessment. *Biological Conservation*. 1 sept 2019;237:525-37.
4. Häkkinen H, Petrovan S, Taylor NG, Sutherland WJ, Pettorelli N. Climate Change Vulnerability and Potential Conservation Actions. 8 août 2023;
5. GISOM. Recensement national des oiseaux marins nicheurs en France hexagonale (ROMN) Enquête 2020-2022. Résultats des suivis [Internet]. 2023. Disponible sur: https://oiseaux-marins.org/upload/iedit/1/pj/538_2099_ROMN_2020_2022_Bilan_sommaire.pdf
6. Climate Analytics. 1.5°C pathways for the EU27: accelerating climate action to deliver the Paris Agreement. sept 2022; Disponible sur: <https://climateanalytics.org/publications/15c-pathways-for-the-eu27-accelerating-climate-action-to-deliver-the-paris-agreement>
7. Commission Européenne. La Commission définit des mesures immédiates pour soutenir l'industrie éolienne européenne [Internet]. 2023 [cité 4 mars 2024]. Disponible sur: https://france.representation.ec.europa.eu/informations/la-commission-definit-des-mesures-immediates-pour-soutenir-lindustrie-eolienne-europeenne-2023-10-24_fr
8. Perrow MR. Synthèse des effets et impacts des parcs éoliens sur la faune: des communautés benthiques aux oiseaux, en passant par les poissons et les mammifères marins. Séminaire Eolien et Biodiversité - LPO; 2017; Artigues-près-Bordeaux.
9. Reynaud M, Bourhis EL, Soulard T, Perignon Y. Rapport de suivi environnemental de l'éolienne flottante FLOATGEN, site d'essais SEM-REV. nov 2021; Disponible sur: <https://doi.org/10.5281/zenodo.5659296>
10. Perrow MR, Gilroy JJ, Skeate ER, Tomlinson ML. Effects of the construction of Scroby Sands offshore wind farm on the prey base of Little tern *Sternula albifrons* at its most important UK colony. *Marine Pollution Bulletin*. 1 août 2011;62(8):1661-70.
11. Hall R, Topham E, João E. Environmental Impact Assessment for the decommissioning of offshore wind farms. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 1 sept 2022;165:112580.
12. Scott BE, Langton R, Philpott E, Waggitt JJ. Seabirds and Marine Renewables: Are we Asking the Right Questions? In: Shields MA, Payne AIL, éditeurs. *Marine Renewable Energy Technology and Environmental Interactions* [Internet]. Dordrecht: Springer Netherlands;

- 2014 [cité 7 sept 2023]. p. 81-92. (Humanity and the Sea). Disponible sur: https://doi.org/10.1007/978-94-017-8002-5_7
13. Cook ASCP, Humphreys EM, Bennet F, Masden EA, Burton NHK. Quantifying avian avoidance of offshore wind turbines: Current evidence and key knowledge gaps. *Marine Environmental Research*. sept 2018;140:278-88.
 14. Furness RW, Wade HM, Masden EA. Assessing vulnerability of marine bird populations to offshore wind farms. *Journal of Environmental Management*. avr 2013;119:56-66.
 15. Furness RW. *Seabird Ecology*. Springer Science & Business Media; 2012. 198 p.
 16. Fox AD, Petersen IK. Offshore wind farms and their effects on birds. *Dansk Orn Foren Tidsskr* 113. 2019;86-101.
 17. Hüppop O, Dierschke J, Exo KM, Fredrich E, Hill R. Bird migration studies and potential collision risk with offshore wind turbines: Bird migration and offshore wind farms. *Ibis*. 27 mars 2006;148:90-109.
 18. Everaert J, Stienen EWM. Impact of wind turbines on birds in Zeebrugge (Belgium): Significant effect on breeding tern colony due to collisions. *Biodivers Conserv*. nov 2007;16(12):3345-59.
 19. Krijgsveld K, Fijn RC, Japink M, van Horssen PW, Collier MP, Poot MJM, et al. *Effect Studies Offshore Wind Farm Egmond aan Zee*. Final report on fluxes, flight altitudes and behaviour of flying birds. 14 nov 2011;
 20. Molis M, Hill R, Hüppop O, Bach L, Coppack T, Pelletier S, et al. Measuring bird and bat collision and avoidance. In: *Wildlife and Wind Farms - Conflicts and Solutions: Offshore: Monitoring and Mitigation*. Pelagic Publishing. Exeter, UK; 2019. p. 167-206.
 21. Przybycin M. B-FINDER - automatic bats & birds mortality monitoring for wind power. Actes du Séminaire Eolien et Biodiversité; 2021; 17 et 18 novembre Paris.
 22. Collier MP, Dirksen S, Krijgsveld KL. A review of methods to monitor collisions or micro-avoidance of birds with offshore wind turbines. Part 1: Review. Bureau Waardenburg bv; 2011 sept p. 34. Report No.: 11-078.
 23. Desholm M, Fox AD, Beasley PDL, Kahlert J. Remote techniques for counting and estimating the number of bird-wind turbine collisions at sea: a review: Remote techniques for wind farm bird studies. *Ibis*. 27 mars 2006;148:76-89.
 24. Matzner S, Warfel T, Hull R. ThermalTracker-3D: A thermal stereo vision system for quantifying bird and bat activity at offshore wind energy sites. *Ecological Informatics*. 1 mai 2020;57:101069.
 25. Drewitt AL, Langston RHW. Assessing the impacts of wind farms on birds. *Ibis*. 2006;148(s1):29-42.
 26. Suryan R, Albertani R, Polagye B. A Synchronized Sensor Array for Remote Monitoring of Avian and Bat Interactions with Offshore Renewable Energy Facilities [Internet]. Oregon

State Univ., Corvallis, OR (United States); 2016 juill [cité 26 sept 2023]. Report No.: DOE-OSU-EE0005363. Disponible sur: <https://www.osti.gov/biblio/1323469>

27. Band B. Using a collision risk model to assess bird collision risks for offshore windfarms. 2012; Disponible sur: https://www.bto.org/sites/default/files/u28/downloads/Projects/Final_Report_SOSSO2_Band1ModelGuidance.pdf
28. Cook ASCP, Masden EA. Modelling collision risk and predicting population-level consequences. In: Perrow MR, éditeur. *Wildlife and Wind Farms - Conflicts and Solutions: Offshore: Monitoring and Mitigation*. Pelagic Publishing. Exeter, UK; 2019. p. 135-66.
29. Petersen IK, Fox AD. Changes in bird habitat utilisation around the Horns Rev 1 offshore wind farm, with particular. 2007;
30. Masden EA, Cook ASCP, McCluskie A, Bouten W, Burton NHK, Thaxter CB. When speed matters: The importance of flight speed in an avian collision risk model. *Environmental Impact Assessment Review*. 1 sept 2021;90:106622.
31. Fijn RC, Krijgsveld KL, Poot MJM, Dirksen S. Bird movements at rotor heights measured continuously with vertical radar at a Dutch offshore wind farm. *Ibis*. 2015;157(3):558-66.
32. Lindeboom HJ, Kouwenhoven HJ, Bergman MJN, Bouma S, Brasseur S, Daan R, et al. Short-term ecological effects of an offshore wind farm in the Dutch coastal zone; a compilation. *Environ Res Lett*. août 2011;6(3):035101.
33. Skov H, Heinänen S, Norman T, Wad R, Méndez-Roldán S, Ellis I. ORJIP Bird Collision and Avoidance Study. Final report; United Kingdom: The Carbon Trust.; 2018 avr p. 247.
34. Thaxter CB, Perrow MR. Telemetry and tracking of birds. In: Perrow MR, éditeur. *Wildlife and Wind Farms - Conflicts and Solutions: Offshore: Monitoring and Mitigation*. Pelagic Publishing. Exeter, UK; 2019. p. 96-134.
35. Heerah K, Lejart M. Développement d'une balise de géolocalisation pour les oiseaux marin, Bilan et perspectives du projet GEOBIRD (2017 - 2021). Plouzané: France Energies Marines; 2021 nov p. 10.
36. Cleasby IR, Wakefield ED, Bearhop S, Bodey TW, Votier SC, Hamer KC. Three-dimensional tracking of a wide-ranging marine predator: flight heights and vulnerability to offshore wind farms. *Journal of Applied Ecology*. 2015;52(6):1474-82.
37. Largey N, Cook ASCP, Thaxter CB, McCluskie A, Stokke B&G, Wilson B, et al. Methods to quantify avian airspace use in relation to wind energy development. *Ibis*. 2021;163(3):747-64.
38. Vanermen N, Courtens W, Daelemans R, Lens L, Müller W, Van De Walle M, et al. Attracted to the outside: a meso-scale response pattern of lesser black-backed gulls at an offshore wind farm revealed by GPS telemetry. Votier S, éditeur. *ICES Journal of Marine Science*. 1 mars 2020;77(2):701-10.
39. Lane JV, Jeavons R, Deakin Z, Sherley RB, Pollock CJ, Wanless RJ, et al. Vulnerability of northern gannets to offshore wind farms; seasonal and sex-specific collision risk and demographic consequences. *Marine Environmental Research*. 1 déc 2020;162:105196.

40. Peschko V, Mercker M, Garthe S. Telemetry reveals strong effects of offshore wind farms on behaviour and habitat use of common guillemots (*Uria aalge*) during the breeding season. *Mar Biol.* 26 juill 2020;167(8):118.
41. Maxwell SM, Kershaw F, Locke CC, Connors MG, Dawson C, Aylesworth S, et al. Potential impacts of floating wind turbine technology for marine species and habitats. *Journal of Environmental Management.* avr 2022;307:114577.
42. Ainley DG, Porzig E, Zajanc D, Spear LB. Seabird flight behavior and height in response to altered wind strength and direction. 2015; Disponible sur: https://sora.unm.edu/sites/default/files/MO_43_1_25-36.pdf
43. Kaldellis JK, Apostolou D, Kapsali M, Kondili E. Environmental and social footprint of offshore wind energy. Comparison with onshore counterpart. *Renewable Energy.* juill 2016;92:543-56.
44. Hartman JC, Krijgsveld KL, Poot MJM, Fijn RC, Leopold MF, Dirksen S. Effects on birds of Offshore Wind farm Egmond aan Zee (OWEZ): An overview and integration of insights obtained. 2012;
45. Everaert J. Collision risk and micro-avoidance rates of birds with wind turbines in Flanders. *Bird Study.* 3 avr 2014;61(2):220-30.
46. Hüppop O, Hüppop K, Dierschke J, Hill R. Bird collisions at an offshore platform in the North Sea. *Bird Study.* 2 janv 2016;63(1):73-82.
47. Intergovernmental Panel On Climate Change. *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Internet]. 1^{re} éd. Cambridge University Press; 2023 [cité 20 sept 2023]. Disponible sur: <https://www.cambridge.org/core/product/identifier/9781009157896/type/book>
48. Green RE, Langston RHW, McCluskie A, Sutherland R, Wilson JD. Lack of sound science in assessing wind farm impacts on seabirds. *Journal of Applied Ecology.* 2016;53(6):1635-41.
49. Bradbury G, Trinder M, Furness B, Banks AN, Caldow RWG, Hume D. Mapping Seabird Sensitivity to Offshore Wind Farms. *PLOS ONE.* 11 sept 2014;9(9):e106366.
50. Courbin N, Dortel E, Grémillet D, Lebreton JD, Besnard A. Note sur la démographie pour une aide à la gestion et à la conservation des populations d'Oiseaux marins nicheurs du littoral français métropolitain. *Naturae* [Internet]. 19 oct 2022 [cité 3 oct 2023];(16). Disponible sur: <http://sciencepress.mnhn.fr/fr/periodiques/naturae/2022/16>
51. CNPN. Autosaisine du CNPN sur le développement de l'énergie offshore en France et ses impacts sur la biodiversité, le patrimoine naturel et les paysages [Internet]. MTES, DGALN/DEB, Tour Séquoia, 92055 La Défense cedex; 2021 juill p. 70. Disponible sur: https://www.avis-biodiversite.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/2021-17_avis_autosaisine_cn timer_eolien_offshore_france_du_06_juillet_2021.pdf
52. Dierschke V, Furness RW, Garthe S. Seabirds and offshore wind farms in European waters: Avoidance and attraction. *Biological Conservation.* 1 oct 2016;202:59-68.

53. Leopold MF, Bemmelen RSA van, Zuur AF. Responses of Local Birds to the Offshore Wind Farms PAWP and OWEZ off the Dutch mainland coast [Internet]. Den Burg: IMARES; 2013. Disponible sur: <https://edepot.wur.nl/279573>
54. Welcker J, Nehls G. Displacement of seabirds by an offshore wind farm in the North Sea. *Marine Ecology Progress Series*. 2016;554:173-82.
55. Methratta ET. Distance-Based Sampling Methods for Assessing the Ecological Effects of Offshore Wind Farms: Synthesis and Application to Fisheries Resource Studies. *Frontiers in Marine Science* [Internet]. 2021 [cité 27 sept 2023];8. Disponible sur: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2021.674594>
56. Croll DA, Ellis AA, Adams J, Cook ASCP, Garthe S, Goodale MW, et al. Framework for assessing and mitigating the impacts of offshore wind energy development on marine birds. *Biological Conservation*. déc 2022;276:15.
57. Marques AT, Batalha H, Bernardino J. Bird Displacement by Wind Turbines: Assessing Current Knowledge and Recommendations for Future Studies. *Birds*. 10 déc 2021;2(4):460-75.
58. Searle KR, Mobbs D, Butler A, Furness RW, Trinder M, Daunt F. Finding out the Fate of Displaced Birds (FCR/2015/19): *Scottish Marine and Freshwater Science Vol 9 No 8*. 2018 [cité 27 sept 2023]; Disponible sur: <https://data.marine.gov.scot/dataset/finding-out-fate-displaced-birds>
59. Heinänen S, Žydelis R, Kleinschmidt B, Dorsch M, Burger C, Morkūnas J, et al. Satellite telemetry and digital aerial surveys show strong displacement of red-throated divers (*Gavia stellata*) from offshore wind farms. *Marine Environmental Research*. 1 sept 2020;160:104989.
60. Mendel B, Schwemmer P, Peschko V, Müller S, Schwemmer H, Mercker M, et al. Operational offshore wind farms and associated ship traffic cause profound changes in distribution patterns of Loons (*Gavia* spp.). *Journal of Environmental Management*. 1 févr 2019;231:429-38.
61. Vanermen N, Courtens W, Van De Walle M, Verstraete H, Stienen EWM. Chapter 3 Belgian seabird displacement monitoring program. In: *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*. OD Natural Environment, Marine Ecology and Management. Brussels: Royal Belgian Institute of Natural Sciences; 2021.
62. Peschko V, Mendel B, Müller S, Markones N, Mercker M, Garthe S. Effects of offshore windfarms on seabird abundance: Strong effects in spring and in the breeding season. *Marine Environmental Research*. 1 déc 2020;162:105157.
63. Masden EA, Haydon DT, Fox AD, Furness RW, Bullman R, Desholm M. Barriers to movement: impacts of wind farms on migrating birds. *ICES Journal of Marine Science*. 1 mai 2009;66(4):746-53.
64. Masden EA, Haydon DT, Fox AD, Furness RW. Barriers to movement: Modelling energetic costs of avoiding marine wind farms amongst breeding seabirds. *Marine Pollution Bulletin*. juill 2010;60(7):1085-91.

65. Jacobsen EM, Jensen FP, Blew J. Avoidance Behaviour of Migrating Raptors Approaching an Offshore Wind Farm. In: Bispo R, Bernardino J, Coelho H, Lino Costa J, éditeurs. *Wind Energy and Wildlife Impacts: Balancing Energy Sustainability with Wildlife Conservation* [Internet]. Cham: Springer International Publishing; 2019 [cité 24 oct 2023]. p. 43-50. Disponible sur: https://doi.org/10.1007/978-3-030-05520-2_3
66. Jensen F, Ringgaard R, Blew J, Jacobsen EM. Anholt Offshore Wind Farm. Post-construction Monitoring of Bird Migration. [Internet]. Fredericia, Denmark: DONG Energy; 2016. Disponible sur: https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Vindenergi/resultat_af_post-construction_fuglemoniteringsprogram_2014-2016.pdf
67. Schwemmer P, Mercker M, Haecker K, Kruckenberg H, Kämpfer S, Bocher P, et al. Behavioral responses to offshore windfarms during migration of a declining shorebird species revealed by GPS-telemetry. *Journal of Environmental Management*. 2022;342:118131.
68. Schwemmer P, Pederson R, Haecker K, Bocher P, Fort J, Mercker M, et al. Assessing potential conflicts between offshore wind farms and migration patterns of a threatened shorebird species. *Animal Conservation*. 2023;26(3):303-16.
69. Courbin N, Besnard A, Boncourt E, Grémillet D. Flight heights of Scopoli's shearwaters (*Calonectris diomedea*) in the context of offshore wind farm developments [Internet]. *Ecology*; 2023 mai [cité 3 oct 2023]. Disponible sur: <http://biorxiv.org/lookup/doi/10.1101/2023.05.14.540698>
70. France Energies Marines. France Energies Marines. 2021 [cité 12 sept 2023]. MIGRALION. Disponible sur: <https://www.france-energies-marines.org/projets/migralion/>
71. Michel S. Caractérisation de l'utilisation de l'Arc Atlantique Nord-Est par la faune volante migratrice et marine à l'aide de méthodes complémentaires. 2022;
72. Vanermen N, Onkelinx T, Verschelde P, Courtens W, Van De Walle M, Verstraete H, et al. Assessing seabird displacement at offshore wind farms: power ranges of a monitoring and data handling protocol. *Hydrobiologia*. sept 2015;756(1):155-67.
73. Garthe S, Schwemmer H, Peschko V, Markones N, Müller S, Schwemmer P, et al. Large-scale effects of offshore wind farms on seabirds of high conservation concern. *Sci Rep*. 13 avr 2023;13(1):4779.
74. McDonald C, Searle K, Wanless S, Daunt F. Effects of Displacement from Marine Renewable Development on Seabirds Breeding at SPAs: A Proof of Concept Model of Common Guillemots Breeding on the Isle of May. mai 2012;
75. Dierschke V, Furness RW, Gray CE, Petersen IK, Schmutz JA, Zydalis R, et al. Possible behavioural, energetic and demographic effects of displacement of red-throated divers [Internet]. U.K. Joint Nature Conservation Committee Report. U.K. Joint Nature Conservation Committee; 2017 [cité 14 déc 2023]. Report No.: 605. Disponible sur: <https://pubs.usgs.gov/publication/70196294>
76. Ventura F, Granadeiro JP, Padget O, Catry P. Gadfly petrels use knowledge of the windscape, not memorized foraging patches, to optimize foraging trips on ocean-wide scales. *Proceedings of the Royal Society B* [Internet]. 15 janv 2020 [cité 28 sept 2023]; Disponible sur: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspb.2019.1775>

77. Deakin Z, Cook A, Daunt F, McCluskie A, Morley N, Witcutt E, et al. A review to inform the assessment of the risk of collision and displacement in petrels and shearwaters from offshore wind developments in Scotland. déc 2022;
78. Rezaei F, Contestabile P, Vicinanza D, Azzellino A. Towards understanding environmental and cumulative impacts of floating wind farms: Lessons learned from the fixed-bottom offshore wind farms. *Ocean & Coastal Management*. 1 sept 2023;243:106772.
79. Cour des Comptes Européennes. Énergies marines renouvelables dans l'UE [Internet]. 2023 p. 58. Disponible sur: https://www.eca.europa.eu/ECAPublications/SR-2023-22/SR-2023-22_FR.pdf
80. Willstead E, Gill AB, Birchenough SNR, Jude S. Assessing the cumulative environmental effects of marine renewable energy developments: Establishing common ground. *Science of The Total Environment*. 15 janv 2017;577:19-32.
81. Brignon JM, Nexer M, Lejart M, Thiebaud L, Michel S, Quentric A. Rapport ECUME. Note de recommandations pour le cadrage de l'évaluation des impacts cumulés éolien en mer [Internet]. 2021. Disponible sur: https://www.eoliennesenmer.fr/sites/eoliennesenmer/files/fichiers/2022/10/Rapport%20ECUME%20coul%C3%A9%20dans%20gabarit%20MTE%20-%20V2_0.pdf
82. Poot MJM, van Horssen PW, Collier MP, Lensink R, Dirksen S. Effect studies Offshore Wind Egmond aan Zee: cumulative effects on seabirds. 18 nov 2011;
83. Vanermen N, Courtens W, Van De Walle M, Verstraete H, Stienen EWM. Chapter 4 Seabirds and offshore wind farms - the potential value of sensitivity mapping in marine spatial planning. In: *Memoirs on the Marine Environment - Environmental impacts of offshore wind farms in the Belgian part of the North Sea: Getting ready for offshore wind farm expansion in the North Sea*. 2023. p. 55-67.
84. Guşatu LF, Menegon S, Depellegrin D, Zuidema C, Faaij A, Yamu C. Spatial and temporal analysis of cumulative environmental effects of offshore wind farms in the North Sea basin. *Sci Rep*. 12 mai 2021;11(1):10125.
85. Jongbloed RH, Tamis JE, Van Der Wal JT, De Vries P, Grundlehner A, Piet GJ. Quick scan of cumulative impacts on the North Sea biodiversity: with a focus on selected species in relation to future developments in offshore wind energy [Internet]. Den Helder: Wageningen Marine Research; 2023. Disponible sur: <https://research.wur.nl/en/publications/33761cc6-1325-48bb-89e4-8a7f4b4a6c35>
86. Pollock CJ, Lane JV, Buckingham L, Garthe S, Jeavons R, Furness RW, et al. Risks to different populations and age classes of gannets from impacts of offshore wind farms in the southern North Sea. *Marine Environmental Research*. 1 oct 2021;171:105457.
87. Thaxter CB, Ross-Smith VH, Bouten W, Clark NA, Conway GJ, Masden EA, et al. Avian vulnerability to wind farm collision through the year: Insights from lesser black-backed gulls (*Larus fuscus*) tracked from multiple breeding colonies. *Journal of Applied Ecology*. 2019;56(11):2410-22.

88. Gauld JG, Silva JP, Atkinson PW, Record P, Acácio M, Arkumarev V, et al. Hotspots in the grid: Avian sensitivity and vulnerability to collision risk from energy infrastructure interactions in Europe and North Africa. *Journal of Applied Ecology*. 2022;59(6):1496-512.
89. Soudijn FH, Donk S van, Leopold MF, Wal JT van der, Hin V. Cumulative population-level effects of habitat loss on seabirds 'Kader Ecologie en Cumulatie 4.0'. 2022 [cité 4 oct 2023]; Disponible sur: <https://research.wur.nl/en/publications/cumulative-population-level-effects-of-habitat-loss-on-seabirds-k-2>
90. Potiek A, IJntema G, van Kooten T, Leopold MF, Collier MP. Acceptable Levels of Impact from offshore wind farms on the Dutch Continental Shelf for 21 bird species. A novel approach for defining acceptable levels of additional mortality from turbine collisions and avoidance-induced habitat loss. Version 2: Update based on external reviews. Bureau Waardenburg, Culemborg.: Bureau Waardenburg; 2021 sept. Report No.: 21-0120.
91. Warwick-Evans V, Atkinson PW, Walkington I, Green JA. Predicting the impacts of wind farms on seabirds: An individual-based model. *Journal of Applied Ecology*. 2018;55(2):503-15.
92. Catalano R, Sweeney S. Hornsea Project Four Gannet Displacement and Mortality Evidence Review [Internet]. Ørsted; 2022 mars. Disponible sur: <https://infrastructure.planninginspectorate.gov.uk/wp-content/ipc/uploads/projects/EN010098/EN010098-001144-Hornsea%20Project%20Four%20-%20Other-%20G2.9%20Gannet%20Displacement%20and%20Mortality%20Evidence%20Review.pdf>
93. Everaert J, Peymen J. Aanvullingen op het rapport "Risico's voor vogels en vleermuizen bij geplande windturbines in Vlaanderen": aanzet voor een beoordelings- en significantiekader. 2013 [cité 30 janv 2024]; Disponible sur: <https://pureportal.inbo.be/nl/publications/aanvullingen-op-het-rapport-risicos-voor-vogels-en-vleermuizen-bi>
94. Quentric A, Brivois O, Brignon JM, Colin M. Projet Habecume - Evaluation du risque que représente le cumul de la perte, de la modification et de la perturbation physiques pour les habitats et les communautés benthiques, en prenant pour cas d'étude les parcs éoliens en mer de Courseulles-surMer et Fécamp. GT ECUME. mars 2023;
95. Skiba von R. Fledermäuse in Südwest-Jütland und deren Gefährdung an Offshore-Windenergieanlagen bei Herbstwanderungen über der Nordsee. 2011;
96. American Wind Wildlife Institute (AWWI). 2nd edition: Summary of Bat Fatality Monitoring Data Contained in AWWIC [Internet]. Washington, DC.; 2020 nov p. 28. Disponible sur: <https://rewi.org/resources/awwic-bat-technical-report/>
97. Dürr T. Fledermausverluste an Windenergieanlagen / bat fatalities at windturbines in Europe [Internet]. 2023 [cité 22 janv 2024]. Disponible sur: <https://lfu.brandenburg.de/lfu/de/aufgaben/natur/artenschutz/vogelschutzwarde/arbeits-schwerpunkt-entwicklung-und-umsetzung-von-schutzstrategien/auswirkungen-von-windenergieanlagen-auf-voegel-und-fledermaeuse/#>

98. Bach L, Bach P, Donning A, Götttsche M, Götttsche M, Kesel R, et al. Fledermauswanderung entlang der Wattenmeerinseln der südlichen deutschen Bucht. 2022;
99. Ahlén I, Baagøe HJ, Bach L. Behavior of Scandinavian Bats during Migration and Foraging at Sea. *Journal of Mammalogy*. 15 déc 2009;90(6):1318-23.
100. Brabant R, Laurent Y, Poerink BJ, Degraer S. Activity and behaviour of Nathusius' pipistrelle *Pipistrellus nathusii* at low and high altitude in a North Sea offshore wind farm. *Acta Chiropterologica*. 30 déc 2019;21(2):341-8.
101. Lagerveld S, Poerink BJ, Haselager R, Verdaat H. Bats in Dutch Offshore Wind Farms in Autumn 2012. 2014;
102. Brabant R, Laurent Y, Jonge Poerink B, Degraer S. The Relation between Migratory Activity of *Pipistrellus* Bats at Sea and Weather Conditions Offers Possibilities to Reduce Offshore Wind Farm Effects. *Animals*. déc 2021;11(12):3457.
103. Cryan PM, Barclay RMR. Causes of Bat Fatalities at Wind Turbines: Hypotheses and Predictions. *Journal of Mammalogy*. 15 déc 2009;90(6):1330-40.
104. Rydell J, Wickman A. Bat Activity at a Small Wind Turbine in the Baltic Sea. *acta*. déc 2015;17(2):359-64.
105. Lagerveld S, Mostert K. Are offshore wind farms in the Netherlands a potential threat for coastal populations of noctule? août 2023;
106. Baerwald EF, D'Amours GH, Klug BJ, Barclay RMR. Barotrauma is a significant cause of bat fatalities at wind turbines. *Current Biology*. 26 août 2008;18(16):R695-6.
107. Schutz F. Étude épidémiologique des évènements de mortalité de chiroptères enregistrés par le réseau SMAC [Thèse d'exercice, Médecine vétérinaire]. Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse – ENVT; 2020.
108. Grodsky SM, Behr MJ, Gendler A, Drake D, Dieterle BD, Rudd RJ, et al. Investigating the causes of death for wind turbine-associated bat fatalities. *Journal of Mammalogy*. 14 oct 2011;92(5):917-25.
109. Leroux C, Le Viol I, Valet N, Kerbirou C, Barré K. Disentangling mechanisms responsible for wind energy effects on European bats. *Journal of Environmental Management*. 15 nov 2023;346:118987.
110. Harwood AJP, Perrow MR. Chapter 8: Mitigation for birds with implications for bats. In: Perrow MR, éditeur. *Wildlife and Wind Farms - Conflicts and Solutions: Offshore: Monitoring and Mitigation*. Pelagic Publishing. Exeter, UK; 2019. p. 242-80.
111. Frick WF, Baerwald EF, Pollock JF, Barclay RMR, Szymanski JA, Weller TJ, et al. Fatalities at wind turbines may threaten population viability of a migratory bat. *Biological Conservation*. 1 mai 2017;209:172-7.
112. Marx G. Le parc éolien français et ses impacts sur l'avifaune. Étude des suivis de mortalité réalisés en France de 1997 à 2015 [Internet]. LPO. Paris; 2017. 92 p. Disponible sur: <https://side.developpement-durable.gouv.fr/Default/doc/SYRACUSE/386620/le-parc->

eolien-francais-et-ses-impacts-sur-l-avifaune-etude-des-suivis-de-mortalite-realises-en-fran

113. Lloret J, Wawrzynkowski P, Dominguez-Carrió C, Sardá R, Molins C, Gili JM, et al. Floating offshore wind farms in Mediterranean marine protected areas: a cautionary tale. *ICES Journal of Marine Science*. 21 août 2023;fsad131.
114. Serratosa Lpoez J, Allinson T. AVISTEP The Avian Sensitivity Mapping Tool for Energy Planning [Internet]. BirdLife International. Cambridge, UK; 2022. 31 p. Disponible sur: <https://avistep.birdlife.org/AVISTEPTechnicalManual.pdf>
115. Marques AT, Batalha H, Rodrigues S, Costa H, Pereira MJR, Fonseca C, et al. Understanding bird collisions at wind farms: An updated review on the causes and possible mitigation strategies. *Biological Conservation*. 1 nov 2014;179:40-52.
116. Masden EA, Reeve R, Desholm M, Fox AD, Furness RW, Haydon DT. Assessing the impact of marine wind farms on birds through movement modelling. *J R Soc Interface*. 7 sept 2012;9(74):2120-30.
117. van Bemmelen RSA, Leemans JJ, Collier MP, Green RMW, Middelveld RP, Thaxter CB, et al. Avoidance of offshore wind farms by Sandwich Terns increases with turbine density. *Ornithological Applications*. 18 oct 2023;duad055.
118. Brabant R, Degraer S, Vanermen N. Chapter 6 Turbine size impacts the number of seabird collisions per installed megawatt and offers possibilities for mitigation. In: *Environmental Impacts of Offshore Wind Farms in the Belgian Part of the North Sea: Getting ready for offshore wind farm expansion in the North Sea*. OD Natural Environment, Marine Ecology and Management. Brussels: Royal Belgian Institute of Natural Sciences; 2022. p. 83-91.
119. Legroux N, Ponchon A, Poirson C, Michel S. Synthèse bibliographique sur les oiseaux migrateurs, nicheurs et hivernants dans le détroit du Pas-de-Calais. Levée des risques avifaunistiques en vue de l'implantation potentielle d'un parc éolien au large de Dunkerque [Internet]. 2017 p. 173. Disponible sur: https://www.eoliennesenmer.fr/sites/eoliennesenmer/files/fichiers/2021/08/1_Avifaune-Etat-initial.pdf
120. Miquerol L, Bultel E, Michel S, Coz R, La Rivière M, Sauboua P. Référentiel technique OFB 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 – focus sur les habitats benthiques de métropole et les espèces Natura 2000 [Internet]. Office français de la biodiversité.; 2023 déc p. 896. Disponible sur: <https://www.eoliennesenmer.fr/ref-tech-marha-ofb>
121. van de Laar FJT. Green Light to Birds: Investigation into the Effect of Bird-Friendly Lighting. 2007. Report No.: L15-FA-1.
122. Voigt CC, Rehnig K, Lindecke O, Pētersons G. Migratory bats are attracted by red light but not by warm-white light: Implications for the protection of nocturnal migrants. *Ecology and Evolution*. sept 2018;8(18):9353-61.

123. May R, Nygård T, Falkdalen U, Åström J, Hamre Ø, Stokke BG. Paint it black: Efficacy of increased wind turbine rotor blade visibility to reduce avian fatalities. *Ecology and Evolution*. 2020;10(16):8927-35.
124. Martin GR, Banks AN. Marine birds: Vision-based wind turbine collision mitigation. *Global Ecology and Conservation*. 1 avr 2023;42:e02386.
125. Jeninga L. Does a single black rotor blade reduce bird mortality? 7th Conference on Wind energy and Wildlife impacts; 2023 sept 21; Šibenik, Croatia.
126. Johnston DT, Thaxter CB, Boersch-Supan PH, Humphreys EM, Bouten W, Clewley GD, et al. Investigating avoidance and attraction responses in lesser black-backed gulls *Larus fuscus* to offshore wind farms. *Marine Ecology Progress Series*. 24 mars 2022;686:187-200.
127. Gartman V, Bulling L, Dahmen M, Geißler G, Köppel J. Mitigation Measures for Wildlife in Wind Energy Development, Consolidating the State of Knowledge — Part 1: Planning and Siting, Construction. *Journal of Environmental Assessment Policy and Management* [Internet]. 3 oct 2016 [cité 27 sept 2023]; Disponible sur: <https://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S1464333216500137>
128. Dooling R. Avian Hearing and the Avoidance of Wind Turbines [Internet]. 2002 juin [cité 12 oct 2023] p. NREL/TP-500-30844, 15000693. Report No.: NREL/TP-500-30844, 15000693. Disponible sur: <http://www.osti.gov/servlets/purl/15000693-dJLpJl/native/>
129. Cook ASCP, Ross-Smith S, Viola H, Burton NHK, Beale N, Coleman C, et al. Identifying a range of options to prevent or reduce avian collision with offshore wind farms, using a UK-based case study. [Internet]. British Trust for Ornithology. Vol. BTO Research Report No. 580. 2011 [cité 30 oct 2023]. 199 p. Disponible sur: <https://www.bto.org/our-science/publications/research-reports/identifying-range-options-prevent-or-reduce-avian>
130. Hein C, Straw B. Proceedings from the State of the Science and Technology for Minimizing Impacts to Bats from Wind Energy [Internet]. 2021 mars [cité 30 oct 2023] p. NREL/TP--5000-78557, 1772994, MainId:32474. Report No.: NREL/TP--5000-78557, 1772994, MainId:32474. Disponible sur: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1772994/>
131. Ferrer M, Alloing A, Baumbush R, Morandini V. Significant decline of Griffon Vulture collision mortality in wind farms during 13-year of a selective turbine stopping protocol. *Global Ecology and Conservation*. oct 2022;38:e02203.
132. Tomé R, Canário F, Leitão AH, Pires N, Repas M. Radar Assisted Shutdown on Demand Ensures Zero Soaring Bird Mortality at a Wind Farm Located in a Migratory Flyway. In: Köppel J, éditeur. *Wind Energy and Wildlife Interactions: Presentations from the CWW2015 Conference* [Internet]. Cham: Springer International Publishing; 2017 [cité 23 janv 2024]. p. 119-33. Disponible sur: https://doi.org/10.1007/978-3-319-51272-3_7
133. Sheppard JK, McGann A, Lanzone M, Swaisgood RR. An autonomous GPS geofence alert system to curtail avian fatalities at wind farms. *Animal Biotelemetry*. 13 oct 2015;3(1):43.
134. Robbelein K, Daems PJ, Verstraeten T, Noppe N, Weijtjens W, Helsen J, et al. Effect of curtailment scenarios on the loads and lifetime of offshore wind turbine generator support structures. *J Phys: Conf Ser*. mai 2023;2507(1):012013.

135. Beaudry A, Roche HP. Milan royal versus Éoliennes ? Une analyse du risque de collision du Milan royal (*Milvus milvus*) en fonction de la vitesse de rotation des éoliennes [Internet]. BioWind, éditeur. 2023 [cité 12 sept 2023]. Disponible sur: <https://www.biodiv-wind.com/fr/>, <https://www.biodiv-wind.com/fr/>
136. Martin CM, Arnett EB, Stevens RD, Wallace MC. Reducing bat fatalities at wind facilities while improving the economic efficiency of operational mitigation. *Journal of Mammalogy*. 21 mars 2017;98(2):378-85.
137. Arnett EB, Huso MM, Schirmacher MR, Hayes JP. Altering turbine speed reduces bat mortality at wind-energy facilities. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 2011;9(4):209-14.
138. Brabant R, Rumes B, Degraer S. Chapter 4 Occurrence of intense bird migration events at rotor height in Belgian offshore wind farms and curtailment as possible mitigation to reduce collision risk. In: *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*. OD Natural Environment, Marine Ecology and Management. Brussels: Royal Belgian Institute of Natural Sciences; 2021.
139. Hill R, Hill K, Aumüller R, Schulz A, Dittmann T, Kulemeyer C, et al. Of birds, blades and barriers: Detecting and analysing mass migration events at alpha ventus. In: *Federal Maritime and Hydrographic Agency, Federal Ministry for the Environment NC and NS, éditeurs. Ecological Research at the Offshore Windfarm alpha ventus: Challenges, Results and Perspectives* [Internet]. Wiesbaden: Springer Fachmedien; 2014 [cité 6 nov 2023]. p. 111-31. Disponible sur: https://doi.org/10.1007/978-3-658-02462-8_12
140. Hayes MA, Hooton LA, Gilland KL, Grandgent C, Smith RL, Lindsay SR, et al. A smart curtailment approach for reducing bat fatalities and curtailment time at wind energy facilities. *Ecological Applications*. 2019;29(4):1-18.
141. Bennett EM, Florent SN, Venosta M, Gibson M, Jackson A, Stark E. Curtailment as a successful method for reducing bat mortality at a southern Australian wind farm. *Austral Ecology*. sept 2022;47(6):1329-39.
142. Voigt CC, Kaiser K, Look S, Scharnweber K, Scholz C. Wind turbines without curtailment produce large numbers of bat fatalities throughout their lifetime: A call against ignorance and neglect. *Global Ecology and Conservation*. sept 2022;37:e02149.
143. Singh K, Baker ED, Lackner MA. Curtailing wind turbine operations to reduce avian mortality. *Renewable Energy*. 1 juin 2015;78:351-6.
144. Horton KG, Van Doren BM, Albers HJ, Farnsworth A, Sheldon D. Near-term ecological forecasting for dynamic aeroconservation of migratory birds. *Conservation Biology*. 2021;35(6):1777-86.
145. Bradarić M. The North Sea wind turbine curtailments informed by near-term forecasts. 7th Conference on Wind energy and Wildlife impacts; 2023 sept 21; Šibenik, Croatia.
146. Vergne C. Geo.fr. 2023 [cité 27 sept 2023]. Aux Pays-Bas, des éoliennes à l'arrêt pour laisser les oiseaux migrer en paix. Disponible sur: <https://www.geo.fr/animaux/aux-pays-bas-des-eoliennes-a-larret-pour-laisser-les-oiseaux-migrer-en-paix-214690>

147. Desert T, Schmid B, Delcourt V, Assali C, De Grissac S, Bon C, et al. Projet SEMAFOR - Etat des connaissances et cadrage de l'étude [Internet]. 2022 nov p. 59. Disponible sur: https://oiseaux-marins.org/upload/iedit/1/actualites/Colloque/20220309_resom22/03_semafor_fem.pdf
148. Furness RW, MacArthur D, Trinder M, MacArthur K. Evidence review to support the identification of potential conservation measures for selected species of seabirds. 2013 [cité 31 oct 2023]; Disponible sur: <http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.1.4666.3200>
149. Searle K. Assessing the relevance and demographic consequences of compensatory measures for seabirds through expert elicitation. 7th Conference on Wind energy and Wildlife impacts; 2023 sept 21; Šibenik, Croatia.
150. Jacob C, Bas A, Scemama P, Hay J, Kermagoret C, Vaissière AC, et al. La compensation en mer [Internet]. 2017 [cité 12 févr 2024] p. 5. Report No.: ISSN 1951-641X. Disponible sur: http://www.umramure.fr/electro_doc_amure/D_41_2017.pdf
151. Parc du Banc de Guérande. Bilan environnemental annuel 2022 Saint-Nazaire [Internet]. 2022 p. 27. Report No.: PBG-0121373. Disponible sur: https://www.eoliennesenmer.fr/sites/eoliennesenmer/files/fichiers/2023/08/SNA_Bilan%20environnemental%20annuel%202022-0161722-0.5-1.pdf
152. King, Harwood A. Seabirds and Marine Renewable Energy Sources. In: Ramos J, Pereira L, éditeurs. Volume 1: Seabird Biodiversity and Human Activities. CRC Press; 2022.
153. Harrabin R. Bird charity warns of harm from new wind farm. BBC News [Internet]. 2 janv 2021 [cité 31 oct 2023]; Disponible sur: <https://www.bbc.com/news/science-environment-55509225>
154. Trinder M. Enough is enough? Delivering seabird compensation to keep offshore wind on track. 7th Conference on Wind energy and Wildlife impacts; 2023 sept 19; Šibenik, Croatia.
155. Rouxel Y, Crawford R, Cleasby IR, Kibel P, Owen E, Volke V, et al. Buoys with looming eyes deter seaducks and could potentially reduce seabird bycatch in gillnets. Royal Society Open Science. 5 mai 2021;8(5):210225.
156. Rouxel Y, Arnardóttir H, Opper S. Looming-eyes buoys fail to reduce seabird bycatch in the Icelandic lumpfish fishery: depth-based fishing restrictions are an alternative. R Soc open sci. oct 2023;10(10):230783.
157. LPO France, Caron-Strehlow A, Waugh S, Micol T. Recommandations pour la prévention des captures accidentelles d'oiseaux marins en France métropolitaine. déc 2022; Disponible sur: <https://www.lpo.fr/media/read/22999/file/LPO%20-%20Recommandations%20pour%20la%20pr%C3%A9vention%20des%20captures%20accidentelles.pdf>
158. Pioch S, Jacob C, Ruysen M. Sites naturels de compensation en mer : état de l'art et perspectives d'application contextualisées. Sciences Eaux & Territoires. 2021;38(4):48-55.
159. Żydelis R, Small C, French G. The incidental catch of seabirds in gillnet fisheries: A global review. Biological Conservation. 1 juin 2013;162:76-88.

160. Grémillet D, Ponchon A, Paleczny M, Palomares MLD, Karpouzi V, Pauly D. Persisting Worldwide Seabird-Fishery Competition Despite Seabird Community Decline. *Current Biology*. 17 déc 2018;28(24):4009-4013.e2.
161. Peste F, Paula A, da Silva LP, Bernardino J, Pereira P, Mascarenhas M, et al. How to mitigate impacts of wind farms on bats? A review of potential conservation measures in the European context. *Environmental Impact Assessment Review*. 1 févr 2015;51:10-22.
162. Ouvrard E, Fortin M. Projet de Parc éolien en Mer de Saint- Nazaire. Diagnostic « chauves-souris ». SEPNB, LPO Loire-Atlantique, LPO Vendée ; 2014 sept p. 113.

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

Cette synthèse dresse un état des lieux des connaissances sur ces impacts, leurs facteurs d'influence et les méthodes et technologies mobilisées à ce jour pour tenter de les atténuer.

Ce document pointe par ailleurs un besoin général d'approfondissement de la connaissance scientifique sur ces problématiques.



Agir pour
la biodiversité