



Limiter l'impact de l'énergie éolienne marine sur la faune volante: synthèse des recommandations en l'absence d'évaluations d'efficacité

Synthèse des connaissances

CONTRIBUTEURS

COORDINATION ET REDACTION

Aurélie QUINARD

Joseph LANGRIDGE

CONTRIBUTIONS ET RELECTURES

Aurélien BESNARD

Nicolas HETTE-TRONQUART

Eva L'HOMME

CITATION

Quinard A. and Langridge J. (2025) Limiter l'impact de l'énergie éolienne marine sur la faune volante: synthèse des recommandations en l'absence d'évaluations d'efficacité. Synthèse de connaissances. Paris, France : Fondation pour la Recherche sur la Biodiversité

Table des matières

RESUME EXECUTIF	6
INTRODUCTION	11
OBJECTIF PRINCIPAL DE LA REVUE	13
RESULTATS DESCRIPTIFS DES DOCUMENTS RETENUS	14
Recherche et sélection	14
<i>Processus de sélection des références bibliographiques</i>	<i>14</i>
<i>Sources et type des références sélectionnées.....</i>	<i>15</i>
Caractéristiques clés	17
<i>Évolution chronologique</i>	<i>17</i>
<i>Distribution géographique</i>	<i>18</i>
<i>Taxa concernés.....</i>	<i>19</i>
<i>Caractéristiques des recommandations</i>	<i>21</i>
SYNTHESE NARRATIVE	29
Planification spatiale.....	29
<i>Collaboration et partage de données.....</i>	<i>29</i>
<i>Protocoles standardisés</i>	<i>30</i>
<i>Recherche et suivi.....</i>	<i>30</i>
<i>Évaluation des impacts pour l'implantation des parcs éoliens.....</i>	<i>31</i>
<i>Localisation des parcs éoliens (macro-siting) et exclusion spatiale</i>	<i>35</i>
<i>Configuration des éoliennes au sein des parcs (micro-siting)</i>	<i>36</i>
Planification temporelle.....	38
Bridage des turbines	39
<i>Recherche comportementale et suivi spécifique au site</i>	<i>39</i>
<i>Augmentation de la vitesse de seuil de démarrage</i>	<i>40</i>
<i>Bridage saisonnier.....</i>	<i>41</i>
<i>Bridage adaptatif et intelligent basé sur des conditions spécifiques, des approches prédictives ou de la détection directe.....</i>	<i>41</i>
<i>Collaboration et gestion intégrée.....</i>	<i>43</i>
Visibilité des turbines.....	44
<i>Gestion de l'éclairage.....</i>	<i>44</i>
<i>Design des pales du rotor.....</i>	<i>45</i>
<i>Peinture de la turbine.....</i>	<i>45</i>
<i>Taille de la turbine.....</i>	<i>46</i>
Mesures de dissuasion	48
<i>Effarouchement acoustique par ultrason chez les chauves-souris</i>	<i>48</i>
<i>Effarouchement acoustique chez les oiseaux.....</i>	<i>48</i>
<i>Effarouchement lumineux en lumière UV</i>	<i>48</i>
<i>Effarouchement lumineux en lumière visible</i>	<i>49</i>
<i>Dissuasion par revêtement texturé</i>	<i>49</i>
<i>Effarouchement par signal électromagnétique chez les chauves-souris.....</i>	<i>49</i>
<i>Système anti-perchoir chez les oiseaux marins</i>	<i>49</i>

Renouvellement du parc éolien (« Repowering »)	50
Mesures compensatoires	50
<i>Planification et évaluation des mesures compensatoires</i>	51
<i>Compensation basée sur l'habitat</i>	51
<i>Mesures de conservation espèce-ciblée</i>	51
<i>Compensation basée sur la finance</i>	52
CONCLUSION	53
REGARD D'EXPERTS	54
Choix et efficacité des mesures d'atténuation : une diversité de pratiques et d'approches	54
<i>Une palette de mesures déployées selon les contextes et une reconnaissance unanime de la</i> <i>planification comme levier clé</i>	54
<i>Des critères de sélection contrastés selon les acteurs</i>	55
<i>Une efficacité difficile à documenter en contexte offshore</i>	55
Freins et obstacles rencontrés : un diagnostic partagé	55
<i>Freins techniques et économiques</i>	55
<i>Freins réglementaires et juridiques</i>	56
<i>Freins scientifiques et méthodologiques</i>	56
<i>Freins culturels et institutionnels</i>	56
Structurer la recherche et valoriser les connaissances existantes	57
<i>Une recherche encore morcelée, faiblement structurée à l'échelle nationale</i>	57
<i>Des données sous-exploitées et difficilement accessibles</i>	58
Renforcer le rôle de l'État comme garant d'une intégration cohérente de la biodiversité	58
Conclusion : vers une approche collective et intégrée biodiversité-énergie	59
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES GENERALES	60
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES SELECTIONNEES POUR LA REVUE	63
ANNEXE I: METHODES	i
Recherche d'articles	i
<i>Mots-clés et Équations de recherche</i>	i
<i>Raccourcis et limitations</i>	i
<i>Sources de littérature</i>	i
<i>Estimation de l'exhaustivité de la recherche</i>	ii
Critères d'éligibilité des articles et de sélection des études	ii
Analyse critique : évaluation de la validité des études	iv
Synthèse narrative	iv
ANNEXE II: DETAILS DES EQUATIONS DE RECHERCHE UTILISEES POUR LES REQUETES	vi
ANNEXE III: EVALUATION DE LA CONFORMITE AUX CRITERES D'ELIGIBILITE PAR LES TESTS KAPPA DE FLEISS ET DE RANDOLPH	viii

RESUME EXECUTIF

Contexte et enjeux

Face à l'urgence climatique, la réduction rapide des émissions de gaz à effet de serre est indispensable. La production électrique issue des énergies fossiles étant l'une des principales sources d'émissions de CO₂, la transition énergétique vers les énergies renouvelables joue un rôle clé pour atteindre la neutralité carbone en 2050. L'électrification accrue des usages accentue encore davantage ce besoin. Dans ce contexte, l'éolien offshore apparaît stratégique pour répondre à la demande croissante d'électricité décarbonée, diversifier le mix énergétique et renforcer l'autonomie des États. En France, cette filière se développe rapidement avec un objectif de 40 GW d'ici 2050 selon le « pacte éolien en mer ». Toutefois, malgré ses bénéfices climatiques, l'éolien marin nécessite des infrastructures conséquentes qui perturbent le milieu dans lequel elles sont implantées. En ce sens l'énergie éolienne offshore pose des défis majeurs en matière de biodiversité : perturbation des habitats benthiques, émissions sonores susceptibles de nuire aux mammifères marins, risques de collision pour les oiseaux et chauves-souris, etc. La séquence ERC (éviter, réduire, compenser) et les outils réglementaires associés (évaluation environnementale stratégique, études d'impact) encadrent le développement des projets afin d'en atténuer les effets négatifs sur les écosystèmes. Le véritable enjeu consiste désormais à concilier l'accélération nécessaire du déploiement de l'éolien offshore avec la préservation effective de la biodiversité marine : comment atteindre les objectifs climatiques sans compromettre l'intégrité des écosystèmes ?

Objectifs de l'étude

La Fondation pour la Recherche sur la Biodiversité (FRB), avec le soutien du Mirova Research Center (MRC), a mené une revue de la littérature scientifique, de type Revue Rapide (RR), afin d'évaluer l'efficacité des mesures destinées à réduire les impacts de l'éolien offshore sur la faune volante (oiseaux, chauves-souris et insectes). L'objectif était initialement d'identifier les meilleures pratiques appuyées par des preuves solides. Cependant, face à l'absence d'études empiriques sur l'efficacité réelle de ces mesures en milieu marin, la démarche a été réorientée vers une compilation des recommandations existantes formulées par les experts, afin de mettre en évidence les pratiques jugées pertinentes. La question centrale de la présente synthèse consiste ainsi à identifier ces recommandations en l'absence d'évaluations systématiques prouvant leur efficacité.

Méthodologie

L'étude bibliographique s'est réalisée en stricte concordance avec les lignes directrices sur la conduite et les standards de la "Revue Rapide" développées par la Collaboration for Environmental Evidence (le référentiel pour la synthèse des connaissances en écologie, <https://environmentalevidence.org/information-for-authors/10-guidance-on-the-conduct-and-standards-for-rapid-review-of-evidence/>). Elle inclue des articles scientifiques (littérature académique) et techniques, ainsi que des rapports provenant de bases de données et de sites spécialisés (littérature grise). Les données collectées ont été analysées qualitativement à travers des approches narratives. En raison de l'absence d'études empiriques sur l'efficacité réelle des mesures d'atténuation en contexte marin, la revue s'est concentrée sur l'identification et la catégorisation des recommandations existantes.

Aperçu des références bibliographiques retenues

La recherche documentaire visant à identifier les mesures de réduction des impacts des parcs éoliens marins sur la faune volante (oiseaux, chauves-souris et insectes) a initialement permis d'obtenir 1261 références bibliographiques, doublons inclus. Suite à un processus de sélection objectif, standardisé et rigoureux, 45 documents pertinents ont été retenus.





Les documents recensés soulignent les éléments clés suivants :

- les études sont principalement concentrées en Europe (46,7 %) et aux États-Unis (26,7 %). Les zones maritimes les plus étudiées sont : la Mer du Nord (33,3 %), l'Océan Atlantique Nord (22,2 %), la Mer Baltique (6,7 %) et la Mer Celtique (2,2 %).
- Les oiseaux dominent largement les recommandations (93,3 % des références, 87,1 % des recommandations), suivis par les chauves-souris (26,7 % des références, 22,5 % des recommandations). Aucun document ne traite spécifiquement des insectes. Chez les oiseaux, les recommandations spécifiques mentionnent fréquemment les espèces marines (53 %) et migratrices (12 %).
- Parmi les catégories de recommandations :
 - les outils de planification et d'évaluation des impacts sont les plus fréquents, soulignant l'importance d'anticiper les impacts environnementaux avant l'installation des infrastructures ;
 - l'implantation et le positionnement des parcs et des éoliennes figurent en deuxième position ;
 - les modifications opérationnelles (ex. : bridage), les mesures technologiques ou techniques (ex. : dissuasion acoustique) occupent aussi une place centrale ;
 - la recherche et développement (R&D) est fréquemment recommandée, indiquant une nécessité constante d'améliorer les connaissances et solutions ;
 - les mesures compensatoires et la sensibilisation/formation (des porteurs de projets, services instructeurs,...) sont très peu ou pas représentées dans les recommandations.

La macro-sélection des sites (macro-siting), intégrant des outils d'analyse environnementale, des analyses à long terme, et la collaboration internationale, est particulièrement valorisée. La micro-sélection (micro-siting), impliquant la conception détaillée du parc, complète ces approches à échelle plus fine. Les stratégies de bridage intelligent sont également mises en avant, ainsi que les adaptations techniques visant à améliorer la visibilité des éoliennes (gestion de l'éclairage, peinture des turbines). Enfin, cette synthèse met clairement en avant une priorité donnée aux stratégies d'évitement et de réduction des impacts, avec une demande significative pour davantage de recherche et de développement afin d'évaluer et d'optimiser l'efficacité des mesures existantes.

Panorama des recommandations issues de la synthèse narrative et de l'atelier d'experts¹

Clé des couleurs par taxon

	Oiseaux
	Chauve-souris
	Oiseaux et Chauve-souris
	Insectes et Chauve-souris

¹ Ce panorama réunit plusieurs recommandations, dont certaines déjà très spécifiques ; il ne prétend toutefois pas à l'exhaustivité. Des mesures complémentaires, variantes méthodologiques et niveaux de détail supplémentaires sont présentés dans le rapport complet.

A destination des développeurs et des opérateurs de projets

Phase du projet concerné	Section	Recommandation	Actions spécifiques
Planification stratégique / construction	Planification spatiale & choix du site	Sélectionner en priorité des zones à faible risque écologique	<ul style="list-style-type: none"> - Prioriser une planification spatiale pilotée par l'État, fondée sur des données écologiques consolidées, afin d'éviter les zones à forts enjeux de biodiversité - Utiliser des cartes de sensibilité faunistique et des inventaires naturalistes pour exclure les corridors de migration majeurs - Appliquer un indice de risque multicritère (densité d'oiseaux, hauteur de vol, concentration de chiroptères, attractivité lumineuse) dès l'étude d'impact environnemental (EIE) - Mettre en place des zones tampons minimales autour des colonies et des sites Natura 2000 identifiés - Utiliser la télédétection (radar météo, imagerie satellite) pour repérer les axes migratoires - Conduire une analyse d'impacts cumulatifs intégrant les futurs projets planifiés sur le long terme
	Planification temporelle des travaux	Programmer les activités intrusives hors périodes sensibles	<ul style="list-style-type: none"> - Établir un calendrier faunistique local précisant reproduction, migration, hivernage - Décaler battage de pieux, câblage et levage hors des pics de sensibilité des espèces - Utiliser des matériels à faible niveau sonore ou poser des écrans antibruit mobiles quand les travaux ne peuvent être décalés - Mettre en place un système d'alerte météo-migration pour suspendre les activités lors de passages massifs
	Planification spatiale des travaux	Cartographier et éviter les secteurs de haute densité faunique	<ul style="list-style-type: none"> - Adapter les itinéraires de navires et les vols d'hélicoptères pour éviter les zones de rassemblement
Conception / pré-construction	Conception et implantation générale du parc (macro-siting)	Optimiser la localisation des parcs	<ul style="list-style-type: none"> - Exclure les couloirs migratoires critiques - Exclure les zones à forte densité d'individus ou habitats essentiels (colonies, aires de rassemblement, sites de nourrissage, ...) - Définir des zones tampons de sécurité autour des habitats sensibles, avec distances adaptées aux espèces critiques
	Conception & implantation fine du parc (micro-siting)	Optimiser le placement et le dessin des éoliennes	<ul style="list-style-type: none"> - Ajuster l'orientation des rangées afin de minimiser les barrières perpendiculaires aux couloirs aériens - Intégrer des modèles de flux de vent et d'altitude de vol pour fixer le tirant d'air sous pâles (airgap) optimal - Augmenter le tirant d'air sous pâles (airgap) afin de réduire le risque de collision avec les oiseaux volant à basse altitude - Prévoir des couloirs internes non équipés servant de corridor de déplacements pour les espèces - Ajuster le plan d'implantation après une année de suivi radar mobile et modélisation des couloirs de vol - Réduire le nombre de turbines dans les zones écologiquement sensibles repérées lors des études préalables

Conception / construction / exploitation	Adaptation des infrastructures & visibilité	Rendre les turbines plus détectables et moins attractives	<ul style="list-style-type: none"> - Peindre une seule pale en noir pour améliorer la perception en rotation - Poser des motifs zébrés au pied des mâts pour contraster avec l'horizon marin - Adapter la gestion de l'éclairage nocturne, dans le respect des contraintes de sécurité maritime et aérienne, pour limiter l'attraction lumineuse - Substituer l'éclairage fixe par des feux synchronisés clignotants à intensité réduite homologués aviation - Tester des revêtements mats limitant la réflexion ultraviolette attractive pour les insectes
	Technologies de dissuasion	Expérimenter des dispositifs d'effarouchement complémentaires	<ul style="list-style-type: none"> - Installer des peignes anti-perchoir sur les nacelles et plates-formes de maintenance - Déployer des émetteurs ultrasoniques directionnels activés automatiquement lorsque la vitesse du vent est inférieure à 6 m/s
Exploitation	Arrêt adaptatif des turbines	Mettre en œuvre un arrêt dynamique fondé sur la détection	<ul style="list-style-type: none"> - Coupler radars à balayage, capteurs acoustiques et caméras thermiques pour identifier la faune en approche - Appliquer un algorithme prédictif (vent, température, pression) pour anticiper les nuits à risque pour les chauves-souris - Programmer un arrêt saisonnier nocturne lors des pics migratoires de printemps et d'automne - Fixer une vitesse de coupure accrue les nuits chaudes et humides favorables aux insectes - Relever la vitesse seuil de démarrage des turbines à environ 5 m/s durant les migrations de chauves-souris, modulée par la température nocturne - Optimiser en continu les paramètres de bridage à partir des nouvelles données de suivi et des retours d'expérience - Mettre en place un protocole international de bridage standardisé, révisé régulièrement et adaptable aux contextes régionaux
Exploitation / suivi	Suivi environnemental & validation des modèles (risque de collision, distribution/habitat)	Assurer un suivi continu et améliorer les modèles de risque	<ul style="list-style-type: none"> - Installer un système radar tri-dimensionnel couvrant la colonne d'air jusqu'à 1 000 m - Mettre en place des capteurs acoustiques passifs sur les mâts pour mesurer l'activité des chauves-souris - Mettre à jour les modèles de risque régulièrement avec les nouvelles données - Publier les données brutes sur une plate-forme ouverte sous licence libre - Mettre en œuvre des protocoles robustes de type BACI (Avant-Après-Contrôle-Impact) pour évaluer scientifiquement l'efficacité des mesures - Installer des capteurs sur les phares et autres infrastructures marines pour suivre les chauves-souris migratrices - Combiner observations depuis bateaux, survols aériens et radars pour obtenir une couverture multiscale des déplacements aviaires

Renouvellement du parc	Renouvellement des installations	Profiter du renouvellement pour réduire les impacts	<ul style="list-style-type: none"> - Réaliser une analyse coûts-bénéfices faune avant toute décision de remplacement - Prioriser le démantèlement des turbines à risque élevé identifié par un suivi à long terme - Intégrer les dernières pales à haute visibilité certifiées
Compensation / post-exploitation	Mesures compensatoires écologiques	Compenser les impacts résiduels lorsque l'évitement n'est pas possible	<ul style="list-style-type: none"> - Planifier précisément toute mesure compensatoire : définir objectifs, indicateurs et calendrier avant le déploiement. - Adapter chaque action aux espèces et habitats concernés pour maximiser la pertinence écologique. - Réaliser un suivi rigoureux et de long terme pour quantifier, à l'aide de métriques précises, les pertes et les gains, et vérifier l'efficacité réelle des compensations. - Assurer une coordination interrégionale pour créer des synergies entre les différentes zones de compensation.
Transversal (toutes phases)	Partage des données & gouvernance	Mettre en place une coopération régionale structurée	<ul style="list-style-type: none"> - Créer un protocole commun de métadonnées validé par les autorités - Signer une convention inter-entreprises pour l'échange d'expériences et de dispositifs pilotes - Organiser des ateliers réguliers exploitants–chercheurs afin d'actualiser collectivement les connaissances sur les mesures d'atténuation et de partager les retours d'expérience - Maintenir une base de données régionale avec tableau de bord de mortalité et d'arrêts - Créer un portail unique et interopérable pour centraliser les données environnementales des projets éoliens, piloté par un organisme tiers - Mettre en place un consortium scientifique interinstitutionnel afin de coordonner la recherche et d'harmoniser les protocoles - Autoriser et accompagner des démarches expérimentales (éclairage dynamique, bridage innovant)
		Mettre en place des incitations en faveur de la biodiversité	<ul style="list-style-type: none"> - Réintégrer une pondération environnementale dans les appels d'offres pour encourager l'innovation en faveur de la biodiversité

A destination de la communauté scientifique

Phase du projet concerné	Section	Recommandation	Actions spécifiques
Pré-implantation / planification stratégique	Conception des protocoles de recherche	Définir des méthodes robustes pour anticiper les impacts	<ul style="list-style-type: none"> - Standardiser les protocoles multi-capteurs (visuel – aérien – radar) pour produire une ligne de base comparable entre projets - Appliquer systématiquement des schémas BACI (Avant-Après-Contrôle-Impact) adaptés au contexte marin
	Pilotage des connaissances pré-implantation	Cibler les lacunes de connaissance prioritaires	<ul style="list-style-type: none"> - Cartographier les zones où les connaissances écologiques sont les plus lacunaires à partir des suivis existants - Mettre à jour régulièrement une feuille de route nationale des questions de recherche prioritaires, partagée avec la filière - Mener des expérimentations BACI sur plusieurs sites pour quantifier les impacts cumulatifs et tester les hypothèses clés

Construction / exploitation	Collecte de données & suivi	Harmoniser et optimiser le suivi faunistique en mer	<ul style="list-style-type: none"> - Co-élaborer un protocole international harmonisé (visuel, acoustique, radar 3D, télémétrie) avec inter-calibration obligatoire des méthodes. - Équiper les parcs de dispositifs de détection de dernière génération (radars vertical/scanning, LIDARs, caméras IA) couplés à un monitoring environnemental temps réel - Synchroniser les fenêtres de collecte des données entre projets d'une même façade maritime
	Validation des mesures d'atténuation	Tester et quantifier l'efficacité des dispositifs	<ul style="list-style-type: none"> - Concevoir des protocoles expérimentaux BACI robustes pour tester bridage, dissuasion lumineuse/sonore, augmentation d'airgap, etc. - Publier dans une base internationale les résultats bruts, méthodes et coûts pour permettre des méta-analyses d'efficacité - Développer des métriques normalisées (taux de collision/MWh, effort énergétique) pour comparer les dispositifs
Exploitation / suivi	Analyses & modélisation	Affiner les modèles de risque et de déplacement	<ul style="list-style-type: none"> - Intégrer les conditions micro-météo et la densité d'insectes dans les modèles d'activité chauves-souris - Recalibrer en continu les modèles de risque de collision en couplant les nouvelles données télémétriques multi-espèces - Actualiser annuellement cartes de sensibilité et analyses cumulatives à l'échelle régionale pour guider l'adaptation des mesures - Publier chaque mise à jour de modèle avec son code source et les jeux de données associés - Créer un portail unique interopérable piloté par un organisme tiers pour centraliser les données environnementales
Fin de vie / renouvellement	Retour d'expérience & prospective	Capitaliser sur les démantèlements et repowering	<ul style="list-style-type: none"> - Suivre les changements d'usage de l'espace par la faune après démontage - Mesurer les effets des nouveaux designs haute visibilité installés lors du repowering - Conduire des méta-analyses sur plusieurs parcs démantelés ou repowerés afin d'identifier les tendances à long terme des impacts et des bénéfices éventuels pour la biodiversité.
Transversal (toutes phases)	Coordination & gouvernance scientifique	Renforcer la structuration de la recherche	<ul style="list-style-type: none"> - Pérenniser et soutenir la conférence annuelle Conference on Wind Energy and Wildlife Impacts (CWW) regroupant académiques, institutions et industriels pour aligner protocoles et priorités - Pérenniser et soutenir l'Observatoire de l'Éolien en Mer en tant que consortium scientifique interinstitutionnel pour coordonner projets, financements et capitalisation des connaissances - Plaider pour une pondération environnementale réintroduite dans les appels d'offres afin de financer la recherche appliquée - Mettre en place un fonds de soutien aux publications en accès libre issues des projets éoliens

A destination des agences gouvernementales

Phase du projet concerné	Section	Recommandation	Actions spécifiques
Pré-appel d'offres / planification stratégique	Cadre national de planification	Piloter la planification spatiale à l'échelle de l'État pour éviter les zones sensibles	<ul style="list-style-type: none"> - Élaborer une cartographie nationale des couloirs migratoires et l'intégrer aux appels d'offres - Publier des zones d'exclusion ou de vigilance avant toute mise en concurrence - Mettre à jour les données écologiques régulièrement et les rendre accessibles aux candidats
	Critères de sélection des projets	Réintroduire une pondération environnementale dans les appels d'offres	<ul style="list-style-type: none"> - Définir un pourcentage minimal de points attribué aux engagements biodiversité - Publier un barème national de bonus pour les mesures d'atténuation ambitieuses (airgap, bridage, suivi BACI)
Autorisations et réglementation	Souplesse réglementaire expérimentale	Faciliter les tests de solutions innovantes	- Mettre en place des autorisations temporaires pour l'éclairage dynamique ou le bridage adaptatif
Construction / exploitation	Suivi et contrôle	Renforcer les moyens des services instructeurs pour contrôler la mise en œuvre des mesures	- Recruter et former des agents spécialisés en écologie marine
Exploitation / suivi	Normalisation des protocoles	Harmoniser les méthodes de suivi imposées aux porteurs de projet	<ul style="list-style-type: none"> - Publier des guides méthodologiques nationaux (radar, acoustique, collecte de données) - Imposer des protocoles et procédures standardisés à l'échelle nationale (voire internationale), et dans l'idéal des schémas de types BACI pour évaluer l'efficacité des mesures
	Gouvernance des données	Centraliser et ouvrir les données environnementales	<ul style="list-style-type: none"> - Exiger le dépôt des jeux de données brutes dans un format standard - Créer un portail unique interopérable piloté par un organisme public pour l'accès libre aux données
Transversal (toutes phases)	Coordination recherche-État-industrie	Structurer la recherche appliquée via un consortium national	<ul style="list-style-type: none"> - Financer un programme pluriannuel dédié à l'efficacité des mesures d'atténuation - Lancer un consortium inter-institutionnel chargé d'identifier d'abord les questions de recherche prioritaires, puis d'élaborer pour chacune un protocole de suivi harmonisé et de mutualiser les résultats obtenus
	Soutien à l'innovation environnementale	Inciter financièrement les mesures ambitieuses	- Utiliser des subventions et des incitations fiscales pour stimuler la recherche et le développement de technologies d'atténuation.

INTRODUCTION

L'urgence climatique exige une réduction significative des émissions de gaz à effet de serre pour limiter les impacts du changement climatique. Selon le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), les températures mondiales pourraient en effet augmenter de 1,5°C dès 2030, de 2°C en 2050, et atteindre une élévation probable de 3°C d'ici 2100 (IPCC 2023). Les effets de ce changement climatique affectent gravement à la fois la biodiversité, les écosystèmes, et le bien-être humain (IPBES, 2019). La France a généré environ 13,8 Gt CO₂ en 2024, soit ≈ 36 % des 37,8 Gt CO₂ d'émissions mondiales liées à l'énergie cette année-là (International Energy Agency, 2025a ; International Energy Agency 2025b). En 2023, les émissions liées à la production d'électricité en France sont tombées à 16,1 MtCO₂eq, soit environ 4,2 % d'un total national d'environ 385 MtCO₂eq (Ministère de la Transition Écologique, 2024 ; RTE, 2024). La transition énergétique, en réduisant l'utilisation des énergies fossiles et en développant les énergies renouvelables (ENR), est donc primordiale pour atteindre la neutralité carbone d'ici 2050, objectif fixé par de nombreux pays dans le cadre de l'Accord de Paris (UNFCCC 2015). Pour réduire la consommation d'énergie fossile au-delà du secteur de l'électricité, il faut également intensifier l'électrification des usages. Cela rend d'autant plus nécessaire le développement des énergies renouvelables au-delà des niveaux actuels, afin de satisfaire la demande croissante en électricité décarbonée. En parallèle, tous les acteurs économiques, conformément à la cible 15 du cadre mondial de la biodiversité de Kunming-Montréal, doivent réduire les impacts négatifs sur la biodiversité, y compris les impacts des solutions pour atténuer le changement climatique (cible 8 du cadre mondial). La production énergétique, comme les autres activités humaines, doit ainsi transiter vers des actions plus durables, tout en préservant la biodiversité (Décision 15/4, U.N. Doc. CBD/COP/DEC/15/4 (2022), Stephen, 2023).

L'énergie éolienne joue un rôle clé dans une transition durable. A l'échelle mondiale, elle a connu une croissance rapide ces dernières décennies, devenant une composante majeure des stratégies énergétiques de nombreux pays (REN21, 2021). En France, la capacité totale de production des installations éoliennes marines à générer de l'électricité a été multipliée par trois en 3 ans, pour atteindre 1,5 GW en 2025 (Direction générale de l'énergie et du climat, 2025). En 2022, la filière industrielle de l'éolien en mer a conclu avec l'État un « pacte éolien en mer », fixant pour objectif l'attribution de 2 GW de nouveaux projets par an dès 2025, ainsi qu'une capacité installée de 18 GW d'ici 2035 et 40 GW à l'horizon 2050 (État français & Filière industrielle de l'éolien en mer, 2022). L'éolien marin offre non seulement une alternative aux énergies fossiles, mais contribue également à augmenter l'indépendance énergétique des pays et à diversifier les sources d'énergie. En revanche, le développement rapide et soutenu de ces énergies, qualifiées de renouvelables, doit passer par une évaluation sérieuse de ses impacts sur la biodiversité. Ceci lui permettra de respecter la cible 8 du cadre mondial qui précise qu'il est indispensable d'accroître la résilience par des mesures d'atténuation, tout en réduisant au minimum les effets négatifs et en favorisant les effets positifs de l'action climatique sur la biodiversité.

Malgré ses avantages, l'énergie éolienne pose des défis environnementaux dans de nombreux compartiments. Par exemple, elle impacte les fonds marins benthiques en perturbant les sédiments et en générant du bruit sous-marin susceptible d'affecter les poissons et invertébrés, notamment lors de la phase de construction (Andersson & Stanley, 2020). Les turbines peuvent également modifier les courants et la productivité du phytoplancton, avec des conséquences sur les écosystèmes pélagiques (van der Molen et al., 2014). Des effets positifs ont été observés, comme l'effet « récif artificiel » favorisant la colonisation par certaines espèces (Degraer et al., 2020), tandis que certains impacts tels que les émissions électromagnétiques dues aux câbles ou le dérangement lumineux restent à étudier avec plus de profondeur (BOEM, 2023). Dans ce contexte globalement complexe, ce texte se concentre sur les risques affectant l'avifaune et les chiroptères (Galparsoro et al., 2022). Ils peuvent subir des impacts directs, tels que des collisions entraînant blessures ou mortalité, ou indirects, comme des changements de comportement et de déplacements ou encore des modifications de leurs habitats (Perrow, 2019). Ces effets préoccupent particulièrement dans un contexte où de nombreuses espèces

sont déjà en déclin et font l'objet de protections à différents niveaux (Dias et al., 2019; Frick et al., 2020; Neate-Clegg et al., 2020). L'impact lié aux collisions, très bien documenté sur terre pour certaines espèces (Perrow, 2017), reste plus difficile à étudier en mer, en raison des contraintes liées aux méthodes d'observation et à l'impossibilité d'effectuer des recherches de carcasses. Quelques observations directes ont néanmoins confirmé des collisions pour certains oiseaux marins sur des installations offshore en Europe (Hüppop et al., 2016 ; Skov et al., 2018 ; Bowgen & Cook, 2018). Ces risques proviennent principalement de la présence des structures en mer, mais peuvent être accentués par des comportements d'attraction ou des changements dans la disponibilité des proies près des turbines. Les changements comportementaux sont majeurs, avec des réactions allant de l'évitement à l'attraction, ou encore au déplacement des espèces hors de leurs zones préférentielles (Dierschke et Garthe, 2016). En Europe, plusieurs études ont observé ces comportements chez différentes espèces d'oiseaux marins. L'ampleur et le type d'évitement dépendent fortement des caractéristiques des espèces concernées, ainsi que de la localisation et du design des parcs éoliens (Dierschke et al., 2016; Lamb et al., 2024). L'attraction peut être induite par l'éclairage des turbines et des stations électriques, ou encore par l'effet « récif artificiel » augmentant la disponibilité des proies (Rebke et al., 2019 ; Degraer et al., 2020), mais également par l'effet « réserve » créé par l'interdiction de pêche dans les parcs, qui favorise la protection et l'accumulation de la biomasse locale (van der Molen et al., 2014 ; Hammar et al., 2016). L'éclairage artificiel, particulièrement les lumières blanches continues, attire et désoriente fréquemment les oiseaux migrateurs nocturnes, entraînant des collisions ou un épuisement fatal (Gauthreaux & Belser, 2006 ; Montevecchi, 2006). Ce phénomène d'influence lumineuse est également documenté chez les chauves-souris, principalement via l'attraction des insectes autour des sources lumineuses (Rydell, 1992 ; Azam et al., 2015 ; Cravens & Boyles, 2019). Enfin, les impacts liés à l'altération des habitats, ou effets induits par le milieu, incluent des changements environnementaux physiques et une modification de la disponibilité des ressources alimentaires. Ces effets peuvent découler de perturbations telles que l'introduction d'espèces invasives, l'érosion des fonds marins, l'effet récif artificiel produit par les infrastructures elles-mêmes (Adams et al., 2014 ; Degraer et al., 2020 ; Nielsen et al., 2024 ; Reubens et al., 2013), ou encore de l'effet « réserve » (Gill et al., 2020). Ces modifications peuvent altérer la distribution, l'abondance, ainsi que la structure des communautés de proies, affectant indirectement les espèces aériennes. Toutefois, ces impacts restent complexes à mesurer et globalement mal connus. Face aux incertitudes persistantes quant à l'ampleur exacte de ces impacts en milieu marin, il est essentiel d'adopter une hiérarchie rigoureuse de mesures d'atténuation comprenant l'évitement, la réduction et, en dernier recours, la compensation.

La séquence « Éviter, Réduire, Compenser » (ERC), également appelée hiérarchie d'atténuation, constitue une approche centrale pour réduire les effets de l'éolien en mer sur la faune volante (Croll et al., 2022 ; BOEM, 2024 ; REWI, 2022). Bien que l'expérience accumulée en Europe — où l'industrie éolienne offshore est plus établie — fournisse de premières indications sur la nature et les mécanismes de ces impacts, de nombreuses incertitudes persistent quant à leur ampleur réelle. Dans ce contexte, l'application rigoureuse de l'ERC apparaît essentielle pour encadrer et atténuer les effets de l'éolien marin. La priorité donnée à la première étape « Éviter » se concrétise principalement au stade de la planification, où l'on s'attache à implanter les parcs éoliens marins loin des zones à haut risque pour la faune, comme les couloirs de migration ou les aires de reproduction (Croll et al., 2022). Lorsqu'il n'est pas possible de supprimer totalement les impacts, la seconde étape, « Réduire », intervient lors des phases de conception et d'exploitation, par exemple via le choix de paramètres techniques (micro-siting, hauteur des turbines, dispositifs de dissuasion) et opérationnels (ajustement des vitesses de démarrage, gestion de l'éclairage), afin de minimiser les collisions et les perturbations (Croll et al., 2022). Enfin, lorsque des impacts résiduels subsistent malgré ces mesures, la « Compensation » doit être mise en œuvre en prenant la forme d'actions correctrices visant à rétablir ou améliorer l'état de la biodiversité sur des milieux en proximité fonctionnelle avec le site impacté. Il peut s'agir, entre autres, de la création de nouveaux habitats de nidification ou d'hivernage, de la restauration d'habitats dégradés ou de la lutte contre les espèces invasives (Arnett & May, 2016 ; Natural England, 2022 ; DEFRA, 2025 ; BOEM, 2024). L'objectif final est de contrebalancer les pertes

pour parvenir à une absence de perte nette de biodiversité, voire à un gain de biodiversité, comme l'exige l'article L. 110-1 du Code de l'environnement, en alignement avec les principes de la séquence ERC (Croll et al., 2022 ; BOEM, 2024).

Face aux incertitudes et afin d'assurer l'atteinte effective des objectifs de conservation, le besoin d'une évaluation rigoureuse de l'efficacité de ces différentes mesures a été clairement identifié. Cette démarche permettra de vérifier si les stratégies adoptées apportent effectivement les bénéfices écologiques attendus, et d'ajuster en conséquence les pratiques afin d'améliorer continuellement la gestion environnementale des projets éoliens offshore.

Eolien en mer : le parcours réglementaire

L'implantation des parcs éoliens dans le domaine public maritime français exige : (i) une autorisation environnementale régie par les articles L.181-1 et suivants du Code de l'environnement (Légifrance, 2024); (ii) une concession d'utilisation du domaine public maritime délivrée au titre de l'article L.2124-3 du Code général de la propriété des personnes publiques (Légifrance, 2020); et (iii) une autorisation d'exploiter accordée conformément à l'article L.311-5 du Code de l'énergie (Légifrance, 2024). Au-delà de la mer territoriale, ces décisions sont fusionnées dans l'autorisation unique créée par l'ordonnance n° 2016-1687 du 8 décembre 2016 (Légifrance, 2016). En amont, tout plan ou programme relatif à l'éolien offshore doit faire l'objet d'une évaluation environnementale stratégique en application des articles L.122-4 et R.122-17 (Légifrance, 2023), tandis qu'à l'échelle de chaque parc une étude d'impact environnemental est requise au titre de l'article L.122-1 (Légifrance, 2024). Les procédures d'autorisation incluent une enquête publique garantissant l'information et la participation du public conformément à l'article L.123-1 (Légifrance, 2024) et doivent rester compatibles avec la planification maritime fixée par les documents stratégiques de façade encadrés par les articles R.219-1-7 et suivants (Légifrance, 2017).

OBJECTIF PRINCIPAL DE LA REVUE

La Fondation pour la Recherche sur la Biodiversité (FRB) a initié une revue de la littérature scientifique et technique portant sur l'efficacité des mesures destinées à réduire l'impact des parcs éoliens marins sur la faune volante. Ce projet s'inscrit dans un programme global financé par Mirova Research Center, avec pour objectif d'encourager l'adoption de pratiques efficaces, d'abandonner les pratiques inefficaces et de fournir des recommandations opérationnelles fondées sur des bases scientifiques solides pour améliorer la conciliation entre biodiversité et développement éolien.

Le programme repose sur une collaboration étroite entre divers acteurs et s'articule autour de trois grands axes complémentaires. Premièrement, il comprend des synthèses de connaissances scientifiques, incluant une mise à jour des synthèses traitant des impacts des énergies renouvelables — éolien terrestre, éolien marin et photovoltaïque — sur la biodiversité, ainsi que trois revues qui évaluent l'efficacité des mesures mises en œuvre pour minimiser ces impacts. Deuxièmement, il prévoit un appel à projets de recherche qui a permis de financer quatre projets innovants, sélectionnés récemment, et destinés à produire de nouvelles connaissances sur ces thématiques. Enfin, des ateliers d'experts sont organisés, rassemblant scientifiques et parties prenantes telles que les agences gouvernementales, les régulateurs, les développeurs et les opérateurs de projets. Ces ateliers visent à faciliter les échanges, enrichir les réflexions et optimiser les pratiques en matière de protection de la biodiversité.

Le programme se distingue par une approche intégrée et holistique des défis environnementaux posés par le développement des énergies renouvelables. Il analyse les impacts des principales technologies, de l'éolien terrestre au photovoltaïque en passant par l'éolien en mer, tout en s'appuyant sur une base scientifique rigoureuse pour proposer des solutions d'atténuation

efficaces. De plus, sa dimension prospective, qui inclut le financement de recherches innovantes, souligne son engagement pionnier dans la production de nouvelles connaissances.

La Fondation pour la recherche sur la biodiversité, soutenu par le Mirova Research Center, a entrepris de piloter une synthèse des connaissances (ci-après dénommé «Revue rapide») autour des interactions entre le développement éolien et la biodiversité. Le conseil scientifique du programme a orienté la revue vers un état de la littérature académique et technique sur la question de l'efficacité des solutions et bonnes pratiques mises en place pour limiter l'impact de l'énergie éolienne marine sur la biodiversité volante: oiseaux, chauve-souris et insectes. La revue rapide, forme accélérée de la revue systématique, a pour ambition de fournir des réponses pertinentes dans un temps plus réduit: meilleures pratiques, succès, échecs et lacunes de connaissances. Cette vue d'ensemble est de surcroît essentielle pour orienter les politiques et les pratiques futures, ainsi que pour optimiser le choix des projets où canaliser les investissements financiers vers des pratiques vertueuses au regard de la biodiversité.

Toutefois, dès les premières phases de recherche bibliographique, il est rapidement apparu que les études portant spécifiquement sur l'efficacité des solutions d'atténuation dans le contexte de l'éolien marin étaient extrêmement limitées, voire inexistantes dans les bases de données consultées. Aucune étude facilement et rapidement accessible ne semblait apporter une réponse directe à cette question dans le contexte spécifique de l'éolien marin. Ce constat a été corroboré par la synthèse des connaissances menée par Gulka et al. (2024), intitulée *Strategies for Mitigating Impacts to AeroFauna from Offshore Wind Energy Development: Available Evidence and Data Gaps*. Lorsqu'elle met en avant des éléments de preuve sur l'efficacité de certaines mesures, ces derniers n'ont jamais été évalués spécifiquement dans le cadre de l'éolien marin, mais proviennent d'études menées dans d'autres contextes, notamment celui de l'éolien terrestre. Face à ce constat, la question de la revue a été réorientée afin de se focaliser sur la compilation des recommandations émises par la communauté scientifique. L'objectif est ainsi d'identifier les mesures d'atténuation jugées pertinentes par les experts et d'évaluer les tendances émergentes en matière de bonnes pratiques, malgré l'absence d'évaluations systématiques de leur efficacité.

Ainsi, la question principale de la Revue est la suivante : « Quelle sont les recommandations visant à atténuer les impacts de l'éolien marin sur la faune volante en l'absence d'évaluations d'efficacité ? ».

Note aux lecteurs :

Pour une compréhension approfondie des méthodologies employées dans ce rapport, nous vous invitons à consulter les annexes (ANNEXE I). La section Méthodes y est détaillée, décrivant la stratégie de recherche bibliographique et les critères de sélection des documents retenus. Elle présente également les approches utilisées pour la synthèse narrative. Ces informations offrent un aperçu complet des démarches suivies pour garantir la rigueur scientifique et la robustesse des conclusions présentées.

RESULTATS DESCRIPTIFS DES DOCUMENTS RETENUS

Recherche et sélection

Processus de sélection des références bibliographiques

Les recherches effectuées dans diverses bases de données de publications en ligne ont renvoyé 460 références pour Web of Science, 401 pour Base et 400 pour Google Scholar.

Sur les 1261 références initialement trouvées, 688 références uniques ont été conservées après l'élimination des doublons (Figure 1). L'examen des titres et résumés a permis de retenir 391 citations. Seules 20 références (5,1 %) n'ont pas pu être récupérées en texte entier. Après l'examen des textes

complets, 45 articles pertinents ont été sélectionnés, comprenant 34 articles de recherche primaire et 11 revues. Les textes complets ont été majoritairement exclus en raison d'interventions inappropriées² ou de l'absence de recommandations (72,4 %), ainsi que de populations³ (18,7 %) considérées comme non pertinentes.

Sources et type des références sélectionnées

Toutes les références bibliographiques retenues ont été trouvées grâce aux recherches principales dans les bases de données de publications en ligne, avec une prédominance des références provenant de la base de données Web of Science (39 articles, 86,7 %) (Figure 2). Parmi celles-ci, mise à part une référence provenant d'un chapitre de livre, l'intégralité sont des articles scientifiques, ce qui indique que cette source est particulièrement riche en publications académiques évaluées par des pairs. La base de données BASE fournit quatre références bibliographiques (8,9 %), comprenant un article scientifique, un mémoire de master, une thèse de doctorat et un rapport technique. Il est important de noter que de nombreuses références issues de BASE ont été supprimées en raison de doublons avec celles trouvées dans Web of Science. Cela suggère que BASE est une source importante pour les documents non publiés et les littératures grises, offrant des perspectives complémentaires aux articles scientifiques. Google Scholar a fourni deux références (4,4 %), tous étant des articles scientifiques. À l'instar de BASE, de nombreuses références provenant de Google Scholar ont été supprimées en raison de doublons avec celles trouvées dans Web of Science ou BASE. Ces résultats indiquent que, bien que Google Scholar soit capable de trouver une quantité non négligeable de littérature, il apporte une valeur ajoutée relativement faible par rapport à l'utilisation de Web of Science et BASE. Cependant, il reste une source utile pour accéder à des références qui peuvent ne pas être indexées dans d'autres bases de données académiques. La recherche complémentaire sur des sites internet dédiés aux énergies renouvelables et à l'éolien n'a apporté aucune référence suffisamment informative supplémentaire. Un point notable est que la plateforme *Mitigation Practices Database (MPD) Tool*, utilisée dans cette recherche, n'a recensé aucune étude évaluant l'efficacité des mesures visant à limiter l'impact de l'éolien offshore sur la faune volante. Cette absence est d'autant plus significative que la base de données trouve son origine dans une revue documentaire financée en 2018-2019 par l'Autorité de recherche et de développement énergétique de l'État de New York, qui visait à regrouper et évaluer les stratégies de réduction des effets de l'éolien en mer sur les pêcheries et la faune marine, aérienne et subaquatique.

² lorsqu'un article décrit une action ou un traitement qui ne correspond pas à l'objet de la revue ; par ex étude sur mesures terrestres alors qu'on vise des mesures offshore

³ lorsque les articles portent sur des populations qui « dévient » du périmètre défini – ici, des espèces d'autres taxons que les oiseaux, chauves-souris ou insectes volant.

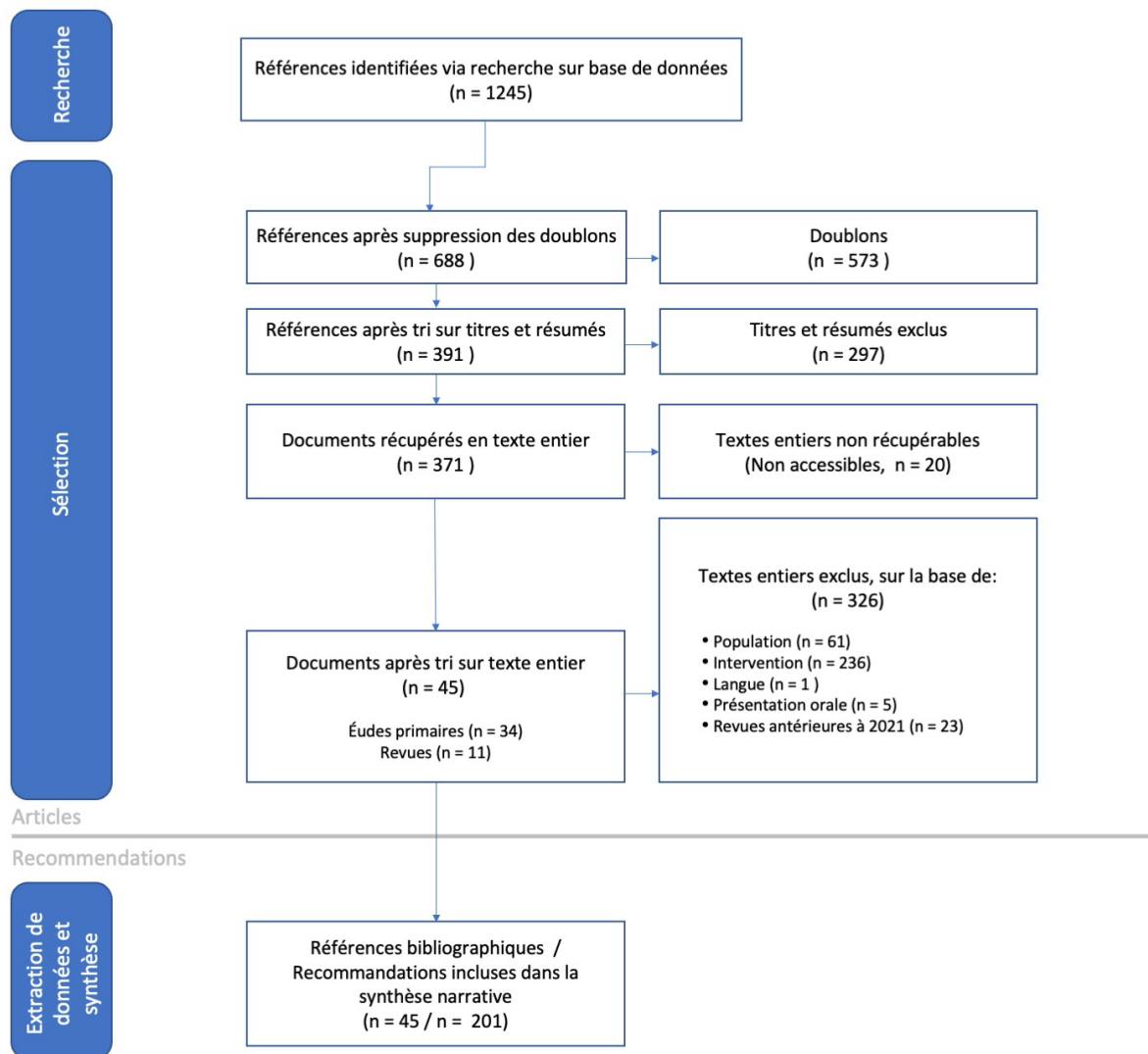


Figure 1. Diagramme de flux ROSES rapportant le processus de sélection des références bibliographiques incluses dans la carte systématique

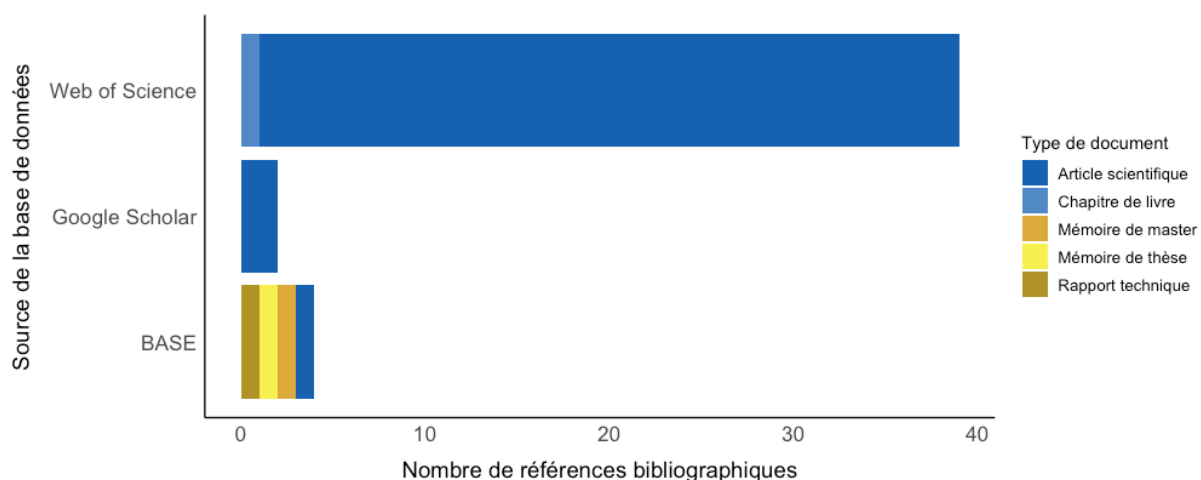


Figure 2. Nombre de références bibliographiques sélectionnées en fonction de sa source et du type de document.

Caractéristiques clés

Évolution chronologique

Les premières publications retenues par notre recherche et sélection bibliographique datent de 2004, révélant un intérêt relativement récent et encore limité pour la réflexion sur l'atténuation des impacts de l'éolien marin sur la biodiversité volante (Figure 3). En effet, le nombre de références recensées de type « Étude primaire » oscille entre aucune et trois de 2004 à 2018. À partir de 2019, une légère augmentation et stagnation du nombre de publications est observée à quatre pour les études primaires. Si nous ajoutons les références de type « Revue » pour les dernières années, le nombre de total de documents ne dépasse pas sept annuellement. Cette tendance indique une légère intensification de la réflexion autour de la prise en compte des impacts de l'éolien marin sur la biodiversité et de la façon de les réduire. L'énergie éolienne s'est développée rapidement ces dernières années, et son impact sur la biodiversité n'a été pleinement pris en compte que tardivement. Si les études sur l'efficacité des mesures d'atténuation se multiplient dans le cas de l'éolien terrestre, la situation reste préoccupante pour l'éolien en mer, où les données scientifiques demeurent plus rares et lacunaires. En effet, nous n'avons trouvé aucune étude scientifique évaluant l'efficacité de ces mesures spécifiquement dans ce contexte. Il convient de préciser que notre recherche bibliographique a été réalisée à la mi-septembre 2024, rendant la revue incomplète pour cette année.

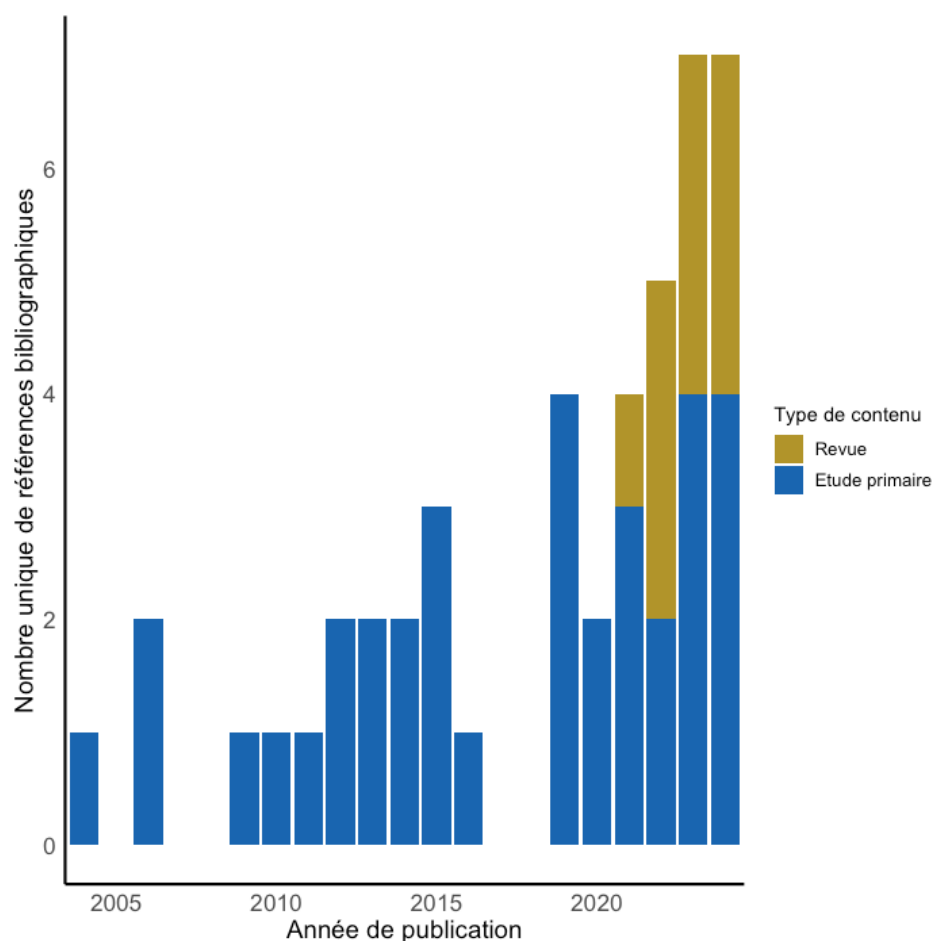


Figure 3. Nombre de références bibliographiques sélectionnées par année de publication et par type de contenu. Les revues n'ont été retenues qu'à partir de l'année 2021. La recherche a été conduite mi-septembre 2024.

Distribution géographique

Lorsqu'elle est précisée (80%), la géographie des références bibliographiques présente une concentration en Europe (46,7 %) et aux Etats-Unis (environ 26,7%), avec une sous-représentation notable d'autres régions (Figure 4). Dans les autres régions du monde, les données sont soit absentes soit très limitées (1 document). Au niveau maritime, la majorité des études recensées concernent la mer du Nord (33,3 %) et l'océan Atlantique Nord (22,2 %), des zones où l'éolien offshore est particulièrement implanté et en constante expansion. Ces régions, bénéficiant de conditions de vent favorables et d'une forte volonté politique en faveur des énergies renouvelables, concentrent une part importante des projets et, par conséquent, des recommandations associées. Dans la même région, la mer Baltique (6,7 %) et la mer Celtique (2,22 %) apparaissent également dans les références, bien que dans une moindre mesure. Cette distribution témoigne de l'évolution des efforts de recherche en fonction des dynamiques d'implantation de l'éolien en mer.

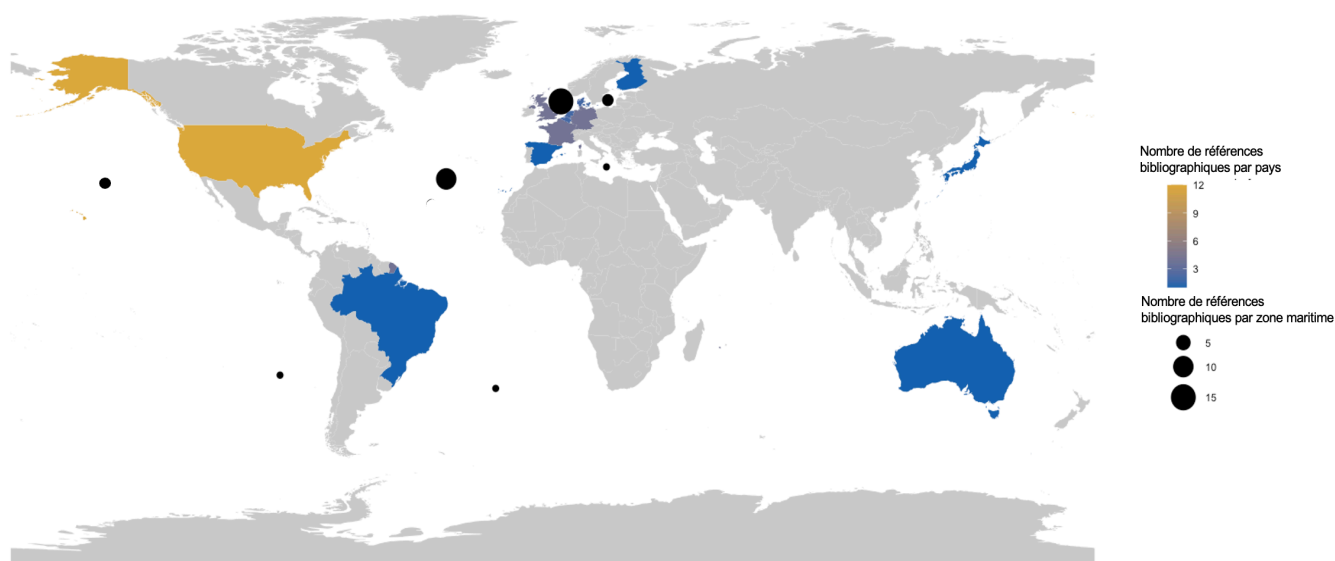


Figure 4. Distribution géographique des références bibliographiques sélectionnées par pays et par mers ou océans. NB: la France ne présente aucune références bibliographiques, mais a été utilisée pour visualiser les études prenant place en Europe au sens large.

Taxa concernés

Il apparaît une répartition inégale des recommandations entre les différents taxons (Figure 5). Les chauves-souris sont représentées par 12 références bibliographiques couvrant 45 recommandations, représentant 26,7 % des références bibliographiques et 22,5 % des recommandations. En comparaison, les oiseaux sont largement dominants, avec 42 références bibliographiques et 175 recommandations, représentant respectivement 93,3 % des références et 87,1 % des recommandations. Aucune recommandation ne concerne les insectes. Lorsque des caractéristiques spécifiques étaient précisées pour les chauves-souris (80 % des cas), elles concernaient uniquement leur statut de migratrices. Pour les oiseaux, près de 53 % des recommandations portaient sur des espèces qualifiées de marines, tandis qu'environ 12 % concernaient des espèces migratrices (Figure 6).

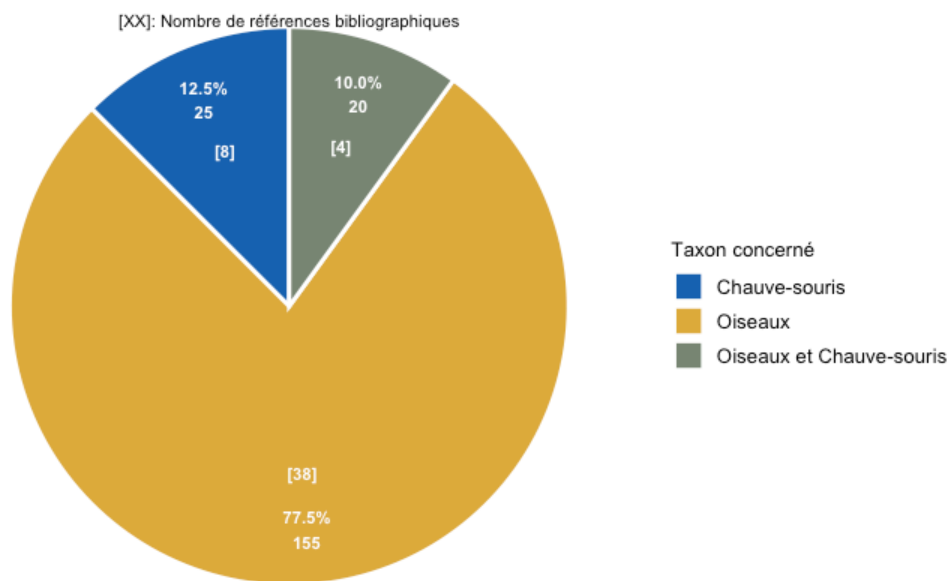


Figure 5. Nombre de recommandations et de références bibliographiques (entre crochets) selon le taxon concerné.

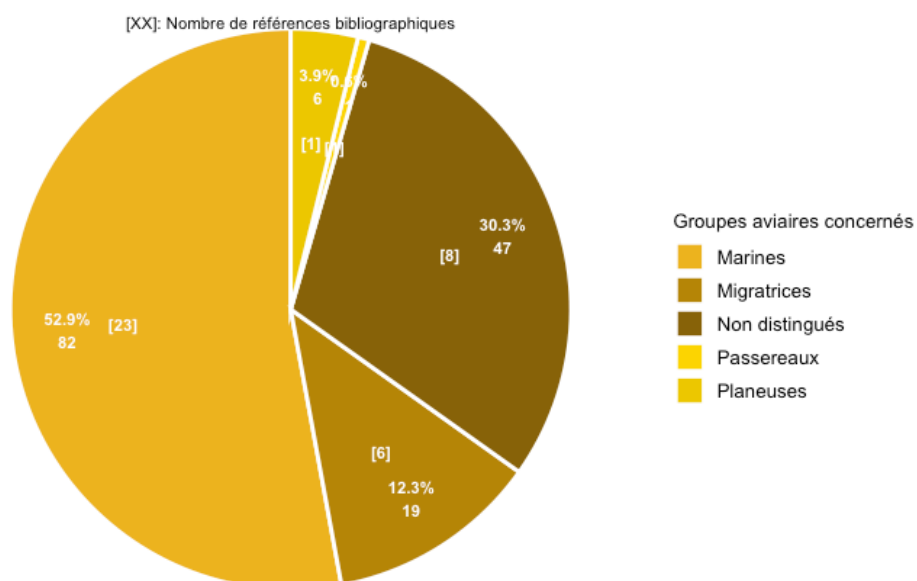


Figure 6. Nombre de recommandations et de références bibliographiques (entre crochets) selon le groupe aviaire concerné.

Caractéristiques des recommandations

Il apparaît que les recommandations faites concernent en première position les « Outils de planification et d'évaluation des impacts » avec près de la moitié des références bibliographiques les évoquant (Figure 7 ; pour une définition des différentes catégories de recommandations voir [ANNEXE I: METHODES](#)). L'« Implantation et positionnement des éoliennes » est également bien représentée, avec 13 références, cette catégorie découlant directement de la première et pouvant être mise en œuvre grâce aux outils de planification. Ensemble, elles constituent les approches les plus fréquemment citées pour anticiper et limiter les impacts environnementaux avant même l'installation des infrastructures. Les « Modifications opérationnelles » et les « Mesures technologiques ou techniques » regroupent aussi un nombre important de références, respectivement 17 et 16, représentant une part importante des recommandations. Ces deux catégories incluent notamment des stratégies de bridage, qu'il s'agisse d'arrêts temporaires des éoliennes en fonction des périodes de migration ou d'ajustements technologiques permettant de réduire les risques pour la faune. La « Recherche et développement (R&D) » occupe également une place notable parmi les recommandations, avec 16 références, témoignant d'un besoin d'amélioration continue des connaissances et des solutions pour limiter les impacts des parcs éoliens en mer. L'« Adaptation des infrastructures », comprenant des mesures influant la visibilité des turbines, est représentée par une dizaine de références. La « Collaboration et gestion intégrée » apparaît dans un nombre plus restreint de références bien qu'elle reste un levier complémentaire pour atténuer les effets de l'éolien offshore. Enfin, les « Améliorations écologiques compensatoires » sont les moins citées indiquant une moindre présence de mesures compensatoires dans les recommandations étudiées. À noter que la catégorie « Sensibilisation et formation » n'apparaît pas du tout dans les références recensées, suggérant une absence ou une faible prise en compte de cette approche dans la littérature examinée.

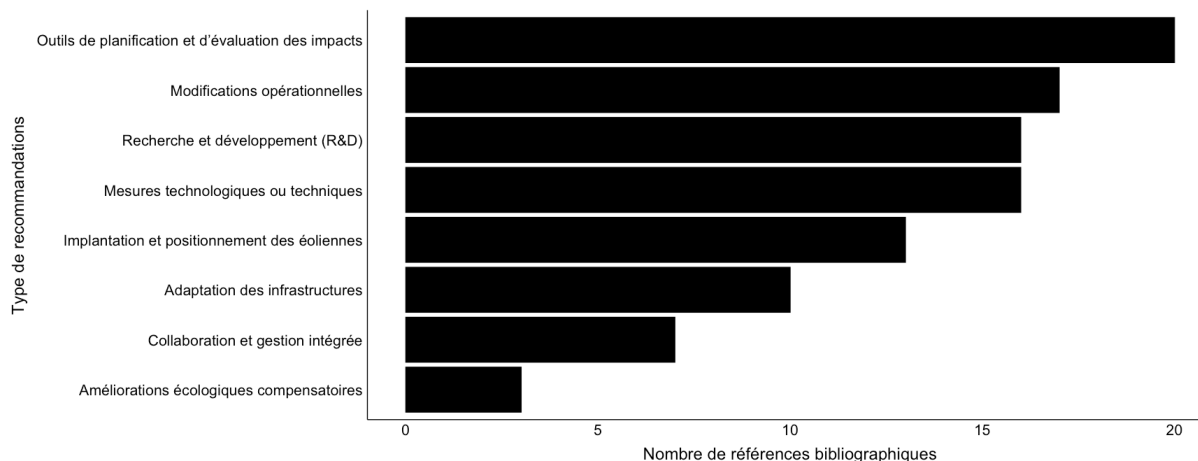


Figure 7. Nombre de références bibliographiques selon les types de recommandations formulées

L'analyse de la répartition du nombre de références bibliographiques par grand type de mesures fait écho à l'importance des types de recommandations (Figure 8). Les mesures les plus fréquemment citées concernent la sélection des sites d'implantation, qui se décline en macro-sélection (*macro-siting*) et micro-sélection (*micro-siting*). La macro-sélection, qui consiste à choisir les zones d'implantation à grande échelle en fonction des enjeux environnementaux, regroupe plus de 30 références bibliographiques, tandis que la micro-sélection, qui affine ces choix à l'échelle locale, en compte 5. L'ensemble de ces références illustre l'importance accordée aux outils de planification et d'évaluation des impacts ainsi qu'à l'implantation et au positionnement des éoliennes, identifiés comme des éléments majeurs des stratégies d'atténuation. Les différentes options de bridage suivent

avec un peu plus de 21 références, mettant en évidence l'attention portée aux modifications opérationnelles et aux mesures technologiques et techniques, qui incluent notamment des ajustements de fonctionnement, comme l'arrêt temporaire des turbines en période critique pour la biodiversité. La visibilité des éoliennes regroupe environ 12 références, soulignant l'intérêt porté aux solutions améliorant la perception des turbines par la faune, à travers des modifications de design ou l'utilisation de signaux visuels spécifiques. Les stratégies de dissuasion (par exemple, la dissuasion acoustique ultrasonique chez les chauves-souris), la planification temporelle, les mesures compensatoires, et le renouvellement des installations (*repowering*) sont les mesures les moins évoquées, avec un nombre de références inférieur ou égal à 5.

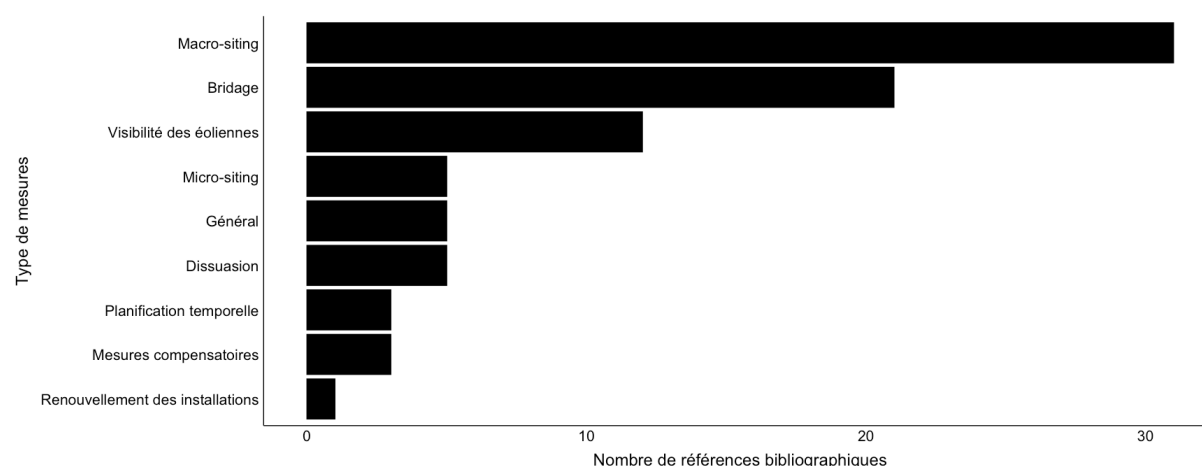


Figure 8. Nombre de références bibliographiques par type de mesures

Le tableau récapitulatif ci-dessous (Tableau 1) détaille les mesures associées aux recommandations identifiées dans la littérature scientifique. Il met en évidence une diversité d'approches au sein des grandes catégories de mesures, tout en montrant que certaines thématiques spécifiques suscitent davantage d'attention de la part des chercheurs.

Dans le cadre de la macro-sélection des sites d'implantation (*macro-siting*), plusieurs aspects sont particulièrement mis en avant. L'analyse à long terme apparaît comme un élément clé pour une planification efficace, permettant d'anticiper plus finement les impacts environnementaux des projets éoliens marins. De plus, l'évaluation des impacts devrait se reposer sur des cadres méthodologiques précis, intégrant divers outils d'analyse environnementale (*Environmental Impact Assessment*). Une collaboration transnationale et multipartite est également soulignée, favorisant un partage des données et une harmonisation des pratiques. L'exclusion des zones à haut risque fait partie des stratégies privilégiées, visant à éviter les implantations dans des secteurs particulièrement sensibles pour la biodiversité.

À une échelle plus fine, la micro-sélection des sites d'implantation (*micro-siting*) se focalise sur des critères plus localisés. Deux aspects ressortent particulièrement : la conception du parc éolien, qui prend en compte les caractéristiques spécifiques du site et le design du parc pour optimiser l'implantation des turbines, et l'intégration des couloirs migratoires, afin d'éviter les conflits avec les trajectoires de déplacement des espèces sensibles.

Le bridage est une autre mesure largement évoquée, notamment à travers deux approches principales. Le bridage intelligent, ou bridage dynamique, qui repose sur des dispositifs de détection et d'optimisation en temps réel, vise à ajuster automatiquement le fonctionnement des éoliennes en fonction de la présence des espèces à risque. Le bridage saisonnier, quant à lui, est basé sur l'arrêt temporaire des turbines lors des périodes critiques, telles que les périodes de migration des oiseaux et des chauves-souris.

Enfin, la visibilité des turbines constitue un axe de recherche important, avec plusieurs recommandations visant à adapter la perception des éoliennes par la faune. Trois stratégies principales émergent : la gestion de l'éclairage, qui vise à limiter l'attraction des oiseaux et des insectes vers les structures, l'ajustement des dimensionnements des turbines, qui peut influencer la perception et les comportements des espèces, et la peinture des turbines, qui explore l'utilisation de couleurs spécifiques ou de motifs pour améliorer la visibilité des pales et réduire le risque de collision chez les oiseaux.

En résumé, cette répartition des références bibliographiques par type de recommandation et de mesure met en avant la priorité donnée à la stratégie d'évitement de la séquence ERC, tandis que les mesures compensatoires semblent considérer comme marginales dans la littérature actuelle. La stratégie de réduction des impacts occupe également une place importante notamment à travers les mesures de bridage et de modifications de la visibilité des turbines. Par ailleurs, une demande significative en recherche et développement (R&D) est également mise en avant, soulignant la nécessité d'améliorer les connaissances sur les impacts de l'éolien marin, de développer des solutions pour limiter ses effets sur la biodiversité et en évaluer les efficacités.

Tableau 1. Liste des caractéristiques des recommandations pour les stratégies d'atténuation des impacts de l'éolien marin sur la faune volante, élaborée à partir de 45 articles scientifiques et autres documents. Un total de 201 enregistrements a été condensé en 9 grands types de mesures, 68 sous-types de mesures et 8 catégories de recommandations.

Type de mesure	Sous-type spécifique	Type de recommandation	Groupe taxonomique	Nombre de références	Références bibliographiques
Macro-siting	Altitude de vol	Recherche et développement (R&D)	Oiseaux	2	Reid et al. (2023); Watts et al. (2022)
	Analyse holistique	Outils de planification et d'évaluation des impacts	Oiseaux	2	Reid et al. (2023); Fox et al. (2006)
	Analyse à long terme	Outils de planification et d'évaluation des impacts	Oiseaux	6	Goyert et al. (2016); Winiarski et al. (2014); Thaxter et al. (2019); Thaxter et al. (2015); Croll et al. (2022); Abramic et al. (2022)
	Cadre d'évaluation des impacts	Collaboration et gestion intégrée	Oiseaux	2	Busch et al. (2013); Walsh et al. (2024)
			Chauve-souris	1	Walsh et al. (2024)
		Modifications opérationnelles	Oiseaux	1	Grover (2023)
		Outils de planification et d'évaluation des impacts	Oiseaux	9	Christel et al. (2013); Reid et al. (2023); Lapena et al. (2010); Fox et al. (2006); Nebel et al. (2024); (Best et Halpin, 2019); (Desholm, 2009); Grover (2023); Croll et al. (2022)
	Collaboration transnationale et multipartite	Collaboration et gestion intégrée	Oiseaux	3	Busch et al. (2013); Walsh et al. (2024); Gulka et al. (2024)
			Chauve-souris	2	Walsh et al. (2024); Gulka et al. (2024)
	Collecte de données	Outils de planification et d'évaluation des impacts	Oiseaux	1	Reid et al. (2023)
		Recherche et développement (R&D)	Oiseaux	1	Cleasby et al. (2015)
	Couloir migratoire	Implantation et positionnement des éoliennes	Chauve-souris	1	Oneil (2020)
			Oiseaux	3	Hueppop et al. (2006); Walsh et al. (2024); Abramic et al. (2022)
		Outils de planification et d'évaluation des impacts	Oiseaux	3	Christel et al. (2013); Hueppop et Hilgerloh (2012); Grover (2023)
		Recherche et développement (R&D)	Chauve-souris	2	True et al. (2023); Oneil (2020)
	Exclusion des zones à haut risque	Implantation et positionnement des éoliennes	Chauve-souris	2	ONEil (2020) ; Gulka et al. (2024)
			Oiseaux	5	Hueppop et al. (2006); Watts et al. (2022); Croll et al. (2022); Abramic et al. (2022); Gulka et al. (2024)

	Expertise scientifique	Outils de planification et d'évaluation des impacts	Oiseaux	2	Lieske et al. (2019); Croll et al. (2022)
	Outil d'évaluation des impacts - Modèle de risque de collision	Recherche et développement (R&D)	Oiseaux	1	Croll et al. (2022)
	Outil d'évaluation des impacts - Modèle déterministe	Outils de planification et d'évaluation des impacts	Oiseaux	1	Lapena et al. (2010)
	Outil d'évaluation des impacts - Indice de sensibilité de la faune	Outils de planification et d'évaluation des impacts	Oiseaux	2	Obane et al. (2024); Garthe et Hüppop (2004)
	Modélisation	Recherche et développement (R&D)	Oiseaux	2	Fox et al. (2006); Croll et al. (2022)
	Outil d'évaluation des impacts	Recherche et développement (R&D)	Oiseaux	1	Nebel et al. (2024)
	Outil d'évaluation des impacts - Carte de sensibilité	Outils de planification et d'évaluation des impacts	Oiseaux	2	Reid et al. (2023); Thaxter et al. (2019)
	Outil d'évaluation des impacts - Modèle de niche écologique	Outils de planification et d'évaluation des impacts	Oiseaux	2	Lemos et al. (2023); Nebel et al. (2024)
	Partage des données	Collaboration et gestion intégrée	Oiseaux	2	(Grover, 2023); Croll et al. (2022)
	Protocoles et procédures standardisés	Collaboration et gestion intégrée	Oiseaux	2	Fox et al. (2006); Busch et al. (2013)
	Recherche comportementale	Recherche et développement (R&D)	Chauve-souris	1	ONeil (2020)
			Oiseaux	3	Schwemmer et al. (2023); Grover (2023); Green et al. (2022)
	Répartition des espèces	Implantation et positionnement des éoliennes	Oiseaux	1	Loring et al. (2014)
		Outils de planification et d'évaluation des impacts	Oiseaux	2	Goyert et al. (2016); Winiarski et al. (2014)
	Zone tampon de sécurité	Implantation et positionnement des éoliennes	Chauve-souris	2	Brabant et al. (2021); Gulka et al. (2024)
			Oiseaux	2	Nebel et al. (2024); Gulka et al. (2024)
	Évaluation des impacts cumulatifs	Outils de planification et d'évaluation des impacts	Oiseaux	2	Thaxter et al. (2019); (Grover, 2023)
Micro-siting	Collecte de données	Recherche et développement (R&D)	Oiseaux	1	Masden et al. (2012)
	Conception du parc éolien	Implantation et positionnement des éoliennes	Oiseaux	3	Masden et al. (2012); Hueppop et al. (2006); Gulka et al. (2024)
			Chauve-souris	1	Gulka et al. (2024)
		Outils de planification et d'évaluation des impacts	Oiseaux	1	Masden et al. (2012)

	Couloir migratoire	Implantation et positionnement des éoliennes	Oiseaux	3	Goodale et Milman (2020); Hueppop et al. (2006); Gorman et al. (2023)
			Chauve-souris	1	Gorman et al. (2023)
	Outil d'évaluation des impacts - Modèle de déplacement des oiseaux	Outils de planification et d'évaluation des impacts	Oiseaux	1	Masden et al. (2012)
Planification temporelle	Planification adaptative et évitement temporel	Modifications opérationnelles	Oiseaux	3	Perrow et al. (2011); Croll et al. (2022); Gulka et al. (2024)
			Chauve-souris	1	Gulka et al. (2024)
Bridage	Adaptation au calendrier migratoire régional	Modifications opérationnelles	Oiseaux	1	Machado et al. (2024)
	Algorithmes de bridage intelligent prédictif	Mesures technologiques ou techniques	Chauve-souris	1	True et al. (2021)
			Chauve-souris	1	True et al. (2021)
	Arrêt ciblé	Mesures technologiques ou techniques	Chauve-souris	1	Bach et al. (2022)
		Modifications opérationnelles	Oiseaux	1	Bradaric et al. (2024)
		Recherche et développement (R&D)	Oiseaux	1	Bradaric et al. (2024)
	Augmentation de la vitesse de seuil de démarrage	Mesures technologiques ou techniques	Chauve-souris	2	Brabant et al. (2021); True et al. (2023)
		Modifications opérationnelles	Chauve-souris	1	Gulka et al. (2024)
	Bridage conditionnel basé sur la météo	Modifications opérationnelles	Oiseaux	2	Grover (2023); Schwemmer et al. (2023)
		Recherche et développement (R&D)	Oiseaux	1	Grover (2023)
	Bridage général	Modifications opérationnelles	Oiseaux	1	Croll et al. (2022)
	Bridage intelligent basée sur la détection	Mesures technologiques ou techniques	Chauve-souris	1	Willmott et al. (2015)
			Oiseaux	2	Willmott et al. (2015); Nebel et al. (2024)
	Bridage intelligent prédictif	Mesures technologiques ou techniques	Chauve-souris	1	True et al. (2023)
			Oiseaux	5	Weiser et al. (2024); Hueppop et Hilgerloh (2012); Hueppop et al. (2006); Walsh et al. (2024); Machado et al. (2024)
			Chauve-souris	2	Solick et Newman (2021); Gulka et al. (2024)
	Bridage saisonnier	Modifications opérationnelles	Oiseaux	2	Brabant et al. (2021); Gulka et al. (2024)
			Oiseaux	2	Schwemmer et al. (2023); Gulka et al. (2024)
			Oiseaux	2	Schwemmer et al. (2023); Gulka et al. (2024)

			Chauve-souris	1	Gulka et al. (2024)
	Bridage saisonnier / Arrêt ciblé	Modifications opérationnelles	Oiseaux	2	Reid et al. (2023); Watts et al. (2022)
	Collaboration transnationale et multipartite	Collaboration et gestion intégrée	Oiseaux	1	Machado et al. (2024)
	Couloir migratoire	Recherche et développement (R&D)	Oiseaux	1	Machado et al. (2024)
	Optimisation continue des procédures de bridage	Modifications opérationnelles	Oiseaux	1	Machado et al. (2024)
	Partage des données	Collaboration et gestion intégrée	Oiseaux	1	Machado et al. (2024)
	Protocoles et procédures standardisés	Collaboration et gestion intégrée	Oiseaux	1	Machado et al. (2024)
	Recherche comportementale	Recherche et développement (R&D)	Oiseaux	1	Machado et al. (2024)
	Suivi spécifique au site	Mesures technologiques ou techniques	Chauve-souris	1	True et al. (2023)
	Évaluation des risques et bridage adaptatif	Modifications opérationnelles	Oiseaux et Chauve-souris	1	Gorman et al. (2023)
Visibilité des éoliennes	Ajustement des dimensions des éoliennes	Adaptation des infrastructures	Oiseaux	4	Reid et al. (2023); Cleasby et al. (2015); Goodale et Milman (2020); Gulka et al. (2024)
	Conception des pales de rotor	Adaptation des infrastructures	Oiseaux	1	Nebel et al. (2024)
	Gestion de l'éclairage	Adaptation des infrastructures	Oiseaux	3	Gulka et al. (2024); Grover (2023); Croll et al. (2022)
		Modifications opérationnelles	Oiseaux	6	Rebke et al. (2019); Goodale et Milman (2020); Hueppop et Hilgerloh (2012); Hueppop et al. (2006); Walsh et al. (2024); Gulka et al. (2024)
			Chauve-souris	1	Gulka et al. (2024)
		Recherche et développement (R&D)	Oiseaux	1	Hueppop et al. (2006)
	Peinture des éoliennes	Adaptation des infrastructures	Insectes (indirectement Chauve-souris)	1	Gulka et al. (2024)
			Oiseaux	1	Martin et Banks (2023)
		Recherche et développement (R&D)	Oiseaux	1	Grover (2023)
	Stimuli visuels généraux	Adaptation des infrastructures	Oiseaux	1	Croll et al. (2022)
				1	
Dissuasion	Système anti-perchoir	Adaptation des infrastructures	Oiseaux	1	Grover (2023)
	Dissuasion acoustique	Mesures technologiques ou techniques	Oiseaux	2	Gulka et al. (2024); Croll et al. (2022)

	Dissuasion acoustique ultrasonique	Mesures technologiques ou techniques	Chauve-souris	2	Solick et Newman (2021); Gulka et al. (2024)
		Recherche et développement (R&D)	Chauve-souris	1	ONeil (2020)
	Dissuasion par la lumière	Mesures technologiques ou techniques	Oiseaux et Chauve-souris	1	Gulka et al. (2024)
	Dissuasion par lumière UV	Adaptation des infrastructures	Oiseaux	1	Gulka et al. (2024)
		Mesures technologiques ou techniques	Chauve-souris	1	Solick et Newman (2021)
	Revêtement texturé	Adaptation des infrastructures	Chauve-souris	1	Solick et Newman (2021)
	Signaux électromagnétiques	Mesures technologiques ou techniques	Chauve-souris	1	Gulka et al. (2024)
Renouvellement des installations	Micro-siting	Implantation et positionnement des éoliennes	Oiseaux et Chauve-souris	1	Gulka et al. (2024)
Mesures compensatoires	Compensation basée sur l'habitat	Améliorations écologiques compensatoires	Oiseaux	3	Reid et al. (2023); Croll et al. (2022); Gulka et al. (2024)
			Chauve-souris	1	Gulka et al. (2024)
	Compensation basée sur la finance (non applicable en France)		Oiseaux	2	Croll et al. (2022); Gulka et al. (2024)
			Chauve-souris	1	Gulka et al. (2024)
	Mesures de conservation ciblées		Oiseaux	2	Gulka et al. (2024); Croll et al. (2022)
	Planification et évaluation des mesures compensatoires		Oiseaux	2	Reid et al. (2023); Croll et al. (2022)
Divers	Collecte de données	Mesures technologiques ou techniques	Oiseaux	2	Grover (2023); Croll et al. (2022)
	Développement de mesures spécifiques d'atténuation des collisions en milieu marin	Recherche et développement (R&D)	Oiseaux		Croll et al. (2022)
				1	
	Efficacité et coût des mesures d'atténuation et de suivi	Recherche et développement (R&D)	Oiseaux et Chauve-souris	1	Green et al. (2022)
	Stratégie adaptative	Mesures technologiques ou techniques	Chauve-souris	1	ONeil (2020)
	Stratégies de minimisation	Adaptation des infrastructures	Oiseaux	1	Abramic et al. (2022)
		Recherche et développement (R&D)	Oiseaux	1	Croll et al. (2022)

SYNTHESE NARRATIVE

Planification spatiale

La planification spatiale constitue une étape centrale dans la conception des parcs éoliens en mer, en ce qu'elle permet d'éviter les impacts les plus critiques sur la faune volante, notamment les oiseaux marins et migrateurs et les chauves-souris migratrices, avant même l'implantation des infrastructures. Elle repose sur l'identification, à l'échelle régionale ou locale, des zones sensibles – corridors migratoires, habitats essentiels, zones d'abondance élevée – afin de guider les choix d'implantation, d'exclusion ou de zonage environnemental. Cette approche préventive, fondée sur les principes de l'aménagement écosystémique (Douve, 2008), s'appuie sur une combinaison de connaissances écologiques, d'outils de modélisation spatiale, de données de suivi et de concertation entre acteurs. Elle vise à concilier au mieux les objectifs de développement énergétique et les exigences de conservation de la biodiversité.

Collaboration et partage de données

La collaboration active et le partage de données ouvertes sont identifiés par plusieurs documents récents comme des éléments clés dans l'optimisation des stratégies de planification spatiale visant à limiter l'impact des parcs éoliens marins sur la biodiversité marine volante.

Le recours à la connaissance d'experts est souligné comme une approche pertinente dans les contextes où les données sont limitées ou incomplètes, notamment à l'échelle régionale ou globale. Lieske et al. (2022) indiquent que l'intégration de l'expertise d'acteurs locaux permet d'améliorer la performance et la robustesse des modèles prédictifs. Ces auteurs montrent que la synthèse qualitative systématique des jugements d'experts via la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process) est utile pour évaluer de manière approfondie et cohérente la sensibilité des oiseaux marins à divers risques environnementaux. Cette approche permet d'intégrer une large gamme de savoirs, incluant des observations directes ou indirectes, l'expérience professionnelle, ainsi que de nombreuses informations issues de sources non publiées ou de littérature grise, dépassant ainsi les limites d'une recherche bibliographique classique. La revue par des experts constituant une étape essentielle dans la validation des modèles écologiques prédictifs, elle permet de repérer d'éventuelles erreurs ou limites, d'améliorer la précision des modèles et de renforcer leur pertinence écologique (Croll et al., 2022).

Concernant la gestion des données collectées, plusieurs auteurs recommandent fortement leur partage public. Grover (2023) souligne notamment que les agences gouvernementales devraient exiger le partage public et systématique des données recueillies dans le cadre de projets éoliens marins comme condition préalable à leur approbation. Ce partage transparent facilite la mutualisation des connaissances et favorise ainsi des décisions mieux informées et plus consensuelles. Dans la même logique, il est conseillé de rendre accessibles et transparents les codes des modèles utilisés, afin de résoudre les préoccupations entourant les incertitudes et la variabilité des paramètres et des données d'entrée (Croll et al., 2022). Une telle démarche permettrait également d'identifier et de surmonter plus facilement les limites méthodologiques des modèles prédictifs existants.

Enfin, plusieurs travaux mettent en évidence la nécessité de renforcer les collaborations transnationales et multipartites dans le cadre du développement de l'éolien en mer. L'importance d'une coopération accrue entre pays voisins est ainsi considérée comme un levier essentiel pour assurer une prise en compte cohérente des objectifs environnementaux dans les projets éoliens offshore (Busch et al., 2013). L'urgence de consolider les coopérations transfrontalières entre acteurs économiques, autorités réglementaires, décideurs politiques et chercheurs, à l'échelle de la grande région maritime de la mer du Nord, est également évoquée pour garantir une évaluation réaliste et robuste des impacts cumulés (Walsh et al., 2024). Par ailleurs, l'engagement précoce des parties prenantes locales et institutionnelles – telles que les communautés, les agences fédérales ou étatiques

– est recommandé afin de limiter les impacts potentiels dès les premières phases du projet, notamment lors de la sélection initiale des sites (Gulka et al., 2024).

Protocoles standardisés

L'importance d'une standardisation des protocoles et procédures à une échelle régionale voire internationale constitue le complément indispensable au partage des données : sans méthodes harmonisées, la comparaison inter-sites perd de sa valeur scientifique. Fox et al. (2006) expriment la nécessité d'adopter des standards communs de bonnes pratiques à un niveau international afin d'assurer une collecte cohérente des données et de permettre une comparaison efficace des expériences acquises sur différents sites éoliens marins. Ces auteurs plaident également pour la mise en place d'un système centralisé de gestion et de conservation des données, afin de garantir que toutes les parties prenantes puissent bénéficier des retours d'expérience et des résultats scientifiques obtenus. De manière similaire, Busch et al. (2013) préconisent d'harmoniser les procédures nationales d'approbation, ainsi que les protocoles d'évaluation et de suivi environnemental liés aux installations marines. Toutefois, ils mettent aussi en garde contre les risques potentiels associés à l'harmonisation, notamment celui d'un nivellement par le bas des objectifs et standards environnementaux nationaux préexistants, comme l'ont illustré certains aspects de la politique commune de pêche européenne. Une harmonisation exige donc un cadre de gouvernance clair, garantissant que les standards minimaux ne soient jamais abaissés.

Recherche et suivi

La collecte rigoureuse de données environnementales et écologiques, le suivi comportemental approfondi, l'analyse des altitudes de vol des oiseaux et chauves-souris, les études à long terme ainsi que le développement de modèles prédictifs performants sont identifiés comme des axes de recherche et de suivi essentiels pour optimiser la planification spatiale des parcs éoliens offshore.

Plusieurs articles insistent sur la nécessité d'une collecte diversifiée et complémentaire de données. Reid et al. (2023) soulignent l'importance d'utiliser conjointement différentes méthodes telles que les observations visuelles depuis des bateaux (précises mais limitées spatialement et temporellement), les survols aériens (grande couverture spatiale mais identification taxonomique limitée), les radars (couverture temporelle extensive mais sans identification des espèces) et, pour affiner encore la hauteur et les trajectoires de vol, des dispositifs embarqués (GPS, altimètres) posés sur les oiseaux, afin d'obtenir une vision complète des usages par les oiseaux des zones destinées aux projets éoliens marins. L'enjeu d'acquérir davantage de données spécifiques, par exemple sur le fou de Bassan et d'autres espèces prioritaires telles que les grands goélands, est rappelée par Cleasby et al. (2015), afin d'affiner les estimations des risques de collision et les seuils de mortalité acceptables nécessaires à la viabilité à long terme des populations.

Approfondir les recherches sur les comportements migratoires des oiseaux marins autour des installations offshore apparaît urgent pour appuyer des décisions de planification fondées sur des preuves solides (Green et al., 2022). Schwemmer et al. (2023) indiquent la nécessité de quantifier les coûts énergétiques associés aux effets barrières cumulés des parcs éoliens marins pour les oiseaux migrants. Pour assurer un suivi continu des déplacements des chauves-souris migratrices, l'utilisation d'un réseau d'infrastructures marines existantes permettrait également d'améliorer significativement la compréhension de leurs schémas de migration (Oneil, 2020). Grover (2023) recommande un effort accru en termes d'inventaires de terrain, d'étude et de modélisation afin de réduire au minimum les risques de collision, particulièrement dans la région marine de Californie et pour d'autres projets similaires dans le monde.

La recherche spécifique sur l'altitude de vol est abordée par deux articles, qui la désignent comme un facteur clé du risque de collision. Un manque important de données empiriques est mis en évidence, et la collecte d'informations spécifiques sur les hauteurs de vol est considérée comme une

priorité pour affiner l'évaluation de l'exposition verticale des oiseaux aux turbines éoliennes offshore (Reid et al., 2023 ; Watts et al., 2022).

Des études à long terme sont indispensables pour garantir une évaluation adéquate des impacts écologiques. Goyert et al. (2016) insistent sur la nécessité d'intégrer la variabilité spatio-temporelle à moyen et long terme dans les analyses d'impact, compte tenu des évolutions climatiques et environnementales. Winiarski et al. (2014) appuient cette recommandation en soulignant que des enquêtes pluriannuelles sont nécessaires pour intégrer efficacement cette variabilité dans les modèles spatiaux. Des suivis prolongés permettent ainsi de saisir pleinement la variabilité comportementale et les interactions saisonnières des oiseaux marins avec les parcs éoliens (Thaxter et al., 2015 ; Thaxter et al., 2019), tout en tenant compte de la variabilité intra- et inter-annuelle afin d'améliorer les modèles prédictifs face aux changements climatiques (Croll et al., 2022). Ces évaluations doivent également s'appuyer sur des séries temporelles actualisées, afin de garantir une représentation précise de l'état de l'environnement marin (Abramic et al., 2022).

Enfin, le développement continu de modèles prédictifs reste un enjeu central pour évaluer les impacts des projets offshore sur la biodiversité. Fox et al. (2006) insistent sur l'importance de modèles capables de traduire les effets locaux observés en impacts au niveau des populations, afin d'évaluer les conséquences des installations offshore sur la faune migratrice. Croll et al. (2022) détaillent que les modèles de distribution d'espèces, s'appuyant sur des données environnementales et de télémétrie, sont nécessaires à une planification spatiale éclairée. Ils précisent néanmoins le besoin de surmonter certaines limites méthodologiques liées à la modélisation des déplacements et des interactions, afin d'améliorer continuellement leur pertinence écologique et leur précision opérationnelle.

Note aux lecteurs :

Des éléments méthodologiques supplémentaires (évaluation de l'efficacité des dispositifs de suivi, besoin d'études BACI, ajustement continu des modèles d'impact) sont détaillés dans la section ci-dessous "Évaluation des impacts pour l'implantation des parcs éoliens", où ils sont replacés dans leur contexte applicatif.

Évaluation des impacts pour l'implantation des parcs éoliens

Le cadre méthodologique utilisé pour évaluer les impacts écologiques des parcs éoliens offshore constitue une étape décisive dans la planification spatiale des projets. Plusieurs documents offrent diverses recommandations visant à renforcer la robustesse, la fiabilité et la pertinence opérationnelle.

Selon Christel et al. (2013), la démarche générale doit s'appuyer sur une catégorisation claire des niveaux d'impact potentiel. Ces niveaux d'impact sont définis à partir des risques majeurs identifiés pour les oiseaux marins : principalement la collision avec les pales des turbines et la perte d'habitats. Chaque niveau d'impact devrait conduire à un protocole de suivi standardisé adapté à l'intensité du risque identifié. Ainsi, une évaluation précise des collisions devrait inclure des relevés détaillés des trajectoires de vol et de la hauteur des déplacements des oiseaux par transects visuels, radar, GPS ou caméras infrarouges. En complément, un suivi régulier pré- et post-installation est nécessaire pour valider les prédictions initiales de l'évaluation environnementale et ajuster en conséquence les pratiques opérationnelles.

Cette approche rejoint celle de Fox et al. (2006), qui mettent en avant l'intérêt crucial d'une évaluation environnementale stratégique (SEA), préalable indispensable à toute implantation de parc éolien offshore. Selon ces auteurs, une SEA nécessite la cartographie détaillée, à grande échelle spatiale, des concentrations saisonnières d'oiseaux marins afin d'identifier en amont les zones sensibles. L'objectif est d'éviter de découvrir tardivement, lors des évaluations d'impacts spécifiques aux projets (EIA), des concentrations importantes d'oiseaux non détectées auparavant, ce qui peut mener à des conflits environnementaux ou à des retards opérationnels majeurs. Ils abordent également l'usage stratégique des radars militaires et météorologiques pour déterminer les couloirs

migratoires et ainsi alimenter des bases de données spatialisées robustes facilitant les analyses d'impacts cumulés à long terme.

Une planification prudente passe par l'intégration du principe de précaution dans les évaluations environnementales et par l'usage systématique d'analyses de puissance pour mesurer l'incertitude liée aux impacts que les suivis ne sont pas en mesure de détecter pas. Même sans signal d'impact statistiquement significatif⁴, cette approche pourrait préciser la probabilité qu'un effet réel reste non détectable statistiquement et aiderait les gestionnaires à définir le degré d'erreur qu'ils sont prêts à accepter lorsqu'ils concluent à l'absence de risque (Lapena et al., 2010). Identifier très tôt les zones écologiquement sensibles demeure ainsi crucial : le développement de cartes croisant le potentiel économique de l'éolien offshore avec les risques encourus par l'avifaune offrirait un appui décisif à la planification. Idéalement, ces outils iraient jusqu'à chiffrer le nombre d'oiseaux exposés et les conséquences démographiques, afin d'éclairer plus finement les choix politiques (Best & Halpin, 2019).

Dans une optique complémentaire, Desholm (2009) propose une approche hiérarchisée de priorisation des espèces basée sur leur abondance relative et leur sensibilité démographique. Cette méthode est jugée adaptée à la gestion des parcs éoliens, car elle offre une solution pragmatique aux ressources limitées en focalisant les efforts de suivi et de conservation sur les espèces dont l'impact écologique serait le plus significatif. Grover (2023) insiste quant à lui sur la nécessité impérieuse d'intégrer, dès la phase initiale de l'évaluation d'impact, des données régionales précises sur les comportements de vol spécifiques et les taux d'évitement des espèces locales. Ces données permettraient de produire des modèles de vulnérabilité plus fiables, ajustés aux spécifications techniques réelles des projets. L'utilisation de cartes de sensibilité écologique qui combinent, à une échelle fine, les distributions spatiales des espèces et leur vulnérabilité écologique permet une visualisation intuitive et opérationnelle des impacts potentiels à l'échelle régionale et locale (Reid et al., 2023).

Par ailleurs, les évaluations préliminaires devraient d'emblée tenir compte des impacts cumulés partagés entre pays voisins (Busch et al., 2013 ; Walsh et al. 2024). Ceci s'inscrit dans une vision plus large de gestion écosystémique du milieu marin, basée sur l'adoption d'une démarche précautionneuse lorsque les données sont incomplètes ou incertaines. Selon ces auteurs, cette approche garantit que les impacts écologiques cumulés de multiples projets éoliens offshore ne compromettent pas l'atteinte du « Bon état écologique » des écosystèmes marins concernés.

Enfin, Nebel et al. (2024) ajoutent que le déplacement des projets vers des zones a priori moins sensibles constitue une stratégie efficace mais nécessitant une analyse approfondie des effets possibles sur d'autres espèces vulnérables. Ils recommandent donc un cadre d'évaluation capable d'intégrer une balance fine entre bénéfices et coûts écologiques pour déterminer une localisation optimale des parcs éoliens.

La précision et la pertinence des évaluations d'impact des parcs éoliens offshore reposent sur l'utilisation d'outils méthodologiques rigoureux, adaptés à la complexité du milieu marin. Les auteurs insistent sur l'importance de développer et d'améliorer continuellement ces outils afin d'obtenir des évaluations fiables pour la prise de décision environnementale.

La planification spatiale exige la prise en compte de la distribution des espèces, tant pour éviter les zones à haute valeur écologique que pour anticiper les impacts potentiels sur les communautés d'oiseaux et de chauves-souris. Cette approche repose sur une compréhension fine de l'abondance relative, de la répartition spatiale et des facteurs écologiques qui déterminent la présence des espèces dans les zones concernées par les projets. Les modèles de distribution spatiale des espèces (Species Distribution Models – SDMs) permettent de cartographier les zones de concentration aviaire à partir de données d'observation croisées avec des variables environnementales (profondeur, température de surface, productivité primaire, distance à la côte, etc.). Par exemple, Winiarski et al. (2014)

⁴ En statistique, dire qu'un effet est « **statistiquement significatif** » revient à affirmer que la probabilité que l'on observe cet effet simplement par hasard est très faible (généralement fixée à moins de 5 %). Autrement dit, les données fournissent des preuves suffisantes pour juger l'impact réel plutôt qu'accidentel.

proposent une approche de priorisation spatiale fondée sur ces modèles, combinée à une planification écosystémique, afin d'identifier les zones à éviter en priorité tant que les effets de l'éolien sur les dynamiques démographiques des espèces concernées ne sont pas encore bien documentés. Ces modèles doivent cependant être construits à partir de données robustes, issues de campagnes d'observation rigoureuses. Les méthodes de collecte de ces données doivent être diversifiées et complémentaires : les suivis aériens ou embarqués apportent une bonne résolution taxonomique mais couvrent des fenêtres spatiales et temporelles limitées, tandis que les données issues du radar permettent une couverture temporelle continue, notamment durant la nuit, mais sans permettre l'identification des espèces, en outre, l'enregistrement de la position de l'avion au moyen du GPS embarqué facilite la géoréférenciation précise de chaque observation et la fusion ultérieure des jeux de données. Une stratégie consiste à combiner ces différentes sources pour produire des modèles prédictifs de la distribution des espèces les plus sensibles. Ce type d'approche a ainsi permis d'identifier l'importance des zones peu profondes, proches du rivage, pour certaines espèces de canards marins comme les macreuses noires. Ces habitats spécifiques – fonds sableux ou mixtes, à moins de 20 mètres de profondeur – concentrent une forte activité alimentaire pendant l'hiver. L'exclusion de ces zones du développement éolien constitue une application directe de la planification fondée sur la distribution aviaire (Loring et al., 2014). La prise en compte de la distribution des espèces ne peut néanmoins se limiter à des observations ponctuelles. La dynamique spatio-temporelle des populations marines, influencée par des cycles saisonniers, interannuels ou des changements climatiques à long terme, impose de considérer ces modèles comme des outils évolutifs, à actualiser régulièrement grâce à des données de suivi. Comme le souligne Goyert et al. (2016), il est nécessaire d'identifier non seulement où se trouvent les espèces, mais aussi pourquoi elles s'y trouvent, en intégrant les facteurs écologiques sous-jacents à leur répartition. Une telle compréhension est indispensable pour estimer leur exposition réelle aux projets et alimenter des évaluations de risque crédibles. De leur côté, Lemos et al. (2023) préconisent de recourir à des modèles de niches écologiques (« ecological niche models », ENM) intégrés directement aux études d'impact environnemental. Ces modèles, particulièrement pertinents pour les zones à faible disponibilité de données écologiques préalables, permettent d'évaluer de manière prospective la distribution probable des espèces sensibles et d'identifier les secteurs à haut risque. Ils proposent également l'utilisation d'un « indice de risque » (« risk index », RI), capable d'améliorer la sélection des périodes et des zones de forte vulnérabilité écologique. Dans ce contexte spécifique d'identification des zones à enjeux, les approches de modélisation de distribution des espèces (SDM) et de niche écologique (ENM) peuvent être considérées comme équivalentes.

Le développement continu d'évaluations environnementales et de suivis permanents est mis en avant comme moyen d'affiner les modèles d'impacts (Nebel et al., 2024). L'utilisation de modèles d'habitats intégrant des analyses d'impacts cumulatifs est également recommandée, afin de mieux appréhender les effets sur les domaines vitaux et les effets démographiques à grande échelle, notamment pour les espèces vulnérables aux collisions, telles que les oiseaux planeurs. Ces modèles devraient être régulièrement actualisés grâce à un suivi continu des collisions et à l'intégration constante de nouvelles données écologiques. Cette recommandation rejoint celle formulée par Thaxter et al. (2019), qui insistent sur l'importance stratégique de produire des cartes de vulnérabilité fondées sur les mouvements réels des oiseaux marins suivis par télémétrie. Contrairement aux approches classiques basées uniquement sur l'abondance observée, ces outils intégrant les comportements individuels permettraient d'identifier avec précision les zones où les risques de collision sont les plus élevés, facilitant ainsi l'élaboration de stratégies d'atténuation plus ciblées, comme le bridage sélectif des turbines. Dans une logique similaire, Reid et al. (2023) recommandent fortement l'utilisation de cartes de sensibilité de la faune sauvage (« wildlife sensitivity maps »). Celles-ci attribuent à chaque cellule géographique un score de risque dérivé des occurrences et sensibilités écologiques des espèces présentes. Ces cartes, utilisables à plusieurs échelles spatiales, sont présentées comme utiles pour affiner la planification spatiale locale des projets. Selon ces auteurs, une telle cartographie détaillée constitue une évolution naturelle des méthodes classiques d'évaluation écologique, offrant une base solide pour l'identification et l'évitement des zones à fort enjeu

écologique dès les premières phases de planification. Ces outils ne doivent pas remplacer les suivis de terrain, mais plutôt être utilisés en complément afin d'optimiser l'allocation des ressources dédiées à la surveillance environnementale. Par ailleurs, Croll et al. (2022) mettent en avant l'importance d'une validation empirique rigoureuse des modèles de risque de collision (« collision risk models », CRM), à l'aide notamment de données de terrain confirmant les incidents réels. Cette validation permettrait d'assurer l'exactitude et la pertinence écologique des paramètres utilisés, réduisant ainsi l'incertitude intrinsèque des modèles prédictifs et renforçant leur crédibilité auprès des décideurs environnementaux. Lapena et al. (2010) proposent une méthode permettant d'évaluer l'efficacité des dispositifs de suivi environnemental eux-mêmes. Leur approche statistique tient compte de l'effort d'échantillonnage et des limites des dispositifs de suivi, fournissant ainsi aux gestionnaires des informations opérationnelles claires sur la manière de concevoir des suivis optimaux et fiables à long terme. Dans une optique méthodologique complémentaire, Obane et al. (2024) se concentrent sur la comparaison systématique de plusieurs modèles d'impacts potentiels sur les oiseaux marins, afin d'évaluer la robustesse et la cohérence des prévisions obtenues. Cette approche comparative permettrait de mieux comprendre les variations méthodologiques et leurs conséquences sur les résultats obtenus, limitant ainsi les risques d'erreurs d'interprétation dans les évaluations finales. Enfin, Garthe et Hüppop (2004) mettent en avant un indice synthétique développé spécifiquement pour la sélection des sites éoliens, intégrant à la fois des données spatiales d'abondance des oiseaux et des études comportementales détaillées. Cet indice, bien que particulièrement utile pour les évaluations stratégiques à grande échelle, ne remplace pas les évaluations locales détaillées. Les auteurs insistent sur la nécessité d'intégrer systématiquement des études de référence (« baseline studies ») étendues dans les évaluations d'impacts environnementaux, afin de replacer les résultats locaux dans une perspective écologique régionale plus large et plus complète.

La prise en compte des impacts cumulatifs dans l'évaluation environnementale des projets éoliens garantit aussi une approche durable du développement énergétique marin. En effet, si les effets d'un parc isolé semblent parfois limités, leur répétition ou leur combinaison à l'échelle régionale, dans le temps ou avec d'autres pressions anthropiques, peut engendrer des conséquences significatives sur les populations d'oiseaux marins et d'autres espèces sensibles. Parmi les préoccupations majeures figurent notamment l'accumulation des risques de collision, des perturbations liées à la perte ou la dégradation d'habitats, et la pression accrue sur les routes migratoires.

Thaxter et al. (2019) rappellent que les effets de déplacement introduits par un parc éolien peuvent également altérer la manière dont les oiseaux interagissent avec d'autres parcs situés à proximité, modifiant trajectoires, comportements de recherche de nourriture ou sites de repos. Ces modifications comportementales, si elles se répètent ou s'accumulent à grande échelle, peuvent ainsi affecter la condition physique des individus et, à terme, compromettre la viabilité des populations. L'analyse cumulative nécessite un changement d'échelle dans la planification et l'évaluation des projets. Plutôt que d'évaluer les impacts de chaque parc de manière isolée, Reid et al. (2023) appellent à une synthèse régionale coordonnée, basée sur une cartographie de sensibilité à l'échelle de bassins entiers comme le détroit de Bass, où la concentration de projets d'éolien marin impose une gestion collective des données et des risques. Cette approche permettrait non seulement d'identifier les zones déjà fortement sollicitées par les infrastructures existantes, mais aussi d'anticiper les effets combinés de nouveaux projets encore en phase de planification. De manière complémentaire, Fox et al. (2006) insistent sur la nécessité de disposer de jeux de données couvrant différentes échelles spatiales et temporelles afin de pouvoir réellement évaluer les impacts globaux des parcs éoliens. Les études avant/après et les suivis intégrant des sites témoins sont considérés comme indispensables pour détecter les effets différés ou indirects, difficilement visibles dans le cadre d'une seule évaluation d'impact localisée. Les auteurs recommandent ainsi la mise en place de protocoles comparatifs robustes et intégrés à l'échelle nationale et internationale.

À titre d'exemple, le cas californien décrit par Grover (2023) illustre bien cette problématique. Alors que les zones d'étude actuelles ne représentent qu'un début dans le développement offshore, les auteurs appellent à ne pas limiter les évaluations aux seuls impacts immédiats des projets existants,

mais à prendre en compte les effets cumulatifs de l'ensemble des projets futurs dans une perspective à long terme. Cette anticipation est essentielle pour garantir que les bénéfices attendus du développement des énergies renouvelables ne se fassent pas au détriment de la biodiversité marine.

Localisation des parcs éoliens (macro-siting) et exclusion spatiale

La localisation des parcs éoliens marins (macro-siting) permet d'éviter les zones les plus sensibles pour l'avifaune et les chiroptères. Les recommandations issues de la littérature convergent vers une stratégie de planification spatiale fondée sur la connaissance détaillée des corridors migratoires des espèces volantes, de leurs zones d'usage critique, et sur l'application de principes de précaution : exclusion de zones ou création de zones tampons.

Les corridors migratoires sont empruntés chaque année par des millions d'individus pour relier leurs zones de reproduction, d'hivernage ou de repos. L'implantation de parcs éoliens dans ces axes de passage augmentent les risques de collision, perturbent la migration, et peuvent créer un effet barrière, réduisant la connectivité fonctionnelle d'habitats essentiels à l'accomplissement du cycle de vie de ces espèces.

Parmi les facteurs de vulnérabilité identifiés, la densité de vol dans ces couloirs est déterminante. Les zones côtières et maritimes les plus fréquentées, notamment celles situées à proximité des colonies de reproduction ou le long des lignes migratoires principales, sont particulièrement sensibles. L'abandon de l'installation d'éoliennes dans les zones de migration dense a été recommandé dans plusieurs études, certaines préconisent d'exclure les projets dans des secteurs caractérisés à la fois par une forte concentration d'individus et par des conditions météorologiques défavorables comme le brouillard ou la bruine, qui diminuent les capacités d'évitement visuel (Hüppop et Hilgerloh, 2012 ; Hüppop et al., 2006).

Ce principe d'évitement se traduit par des stratégies de planification telles que l'exclusion de zones identifiées comme corridors migratoires critiques, y compris les trajets de navette entre les colonies de reproduction et les zones de nourrissage, ou encore les routes migratoires saisonnières empruntées par les chauves-souris arboricoles (Grover, 2023 ; True et al., 2023). Il est par ailleurs suggéré que les turbines soient groupées de manière à créer des couloirs aériens libres entre les regroupements (Abramic et al., 2022).

Plus prospectivement, plusieurs travaux insistent sur la nécessité de cartographier finement les flux migratoires à grande échelle, y compris en altitude, en s'appuyant sur des outils de télédétection, des radars, ou des suivis télémétriques (Walsh et al., 2024 ; Oneil, 2020). Cette approche permet de mieux anticiper les conflits d'usage entre infrastructures énergétiques et trajectoires migratoires, tout en intégrant la variabilité spatio-temporelle des flux fauniques.

La prise en compte des corridors migratoires ne se limite pas aux oiseaux : les chauves-souris migratrices, bien que longtemps négligées dans les projets offshore, font l'objet d'une attention croissante. La compréhension de leurs déplacements, encore lacunaire, est essentielle pour évaluer l'exposition potentielle aux risques et orienter les choix d'implantation dans des zones moins fréquentées (True et al., 2023).

En parallèle des recommandations portant sur l'identification et la prise en compte des corridors migratoires, une autre approche spatiale complémentaire repose sur l'exclusion proactive des zones présentant un enjeu écologique élevé. Ces deux stratégies s'inscrivent ainsi dans une même logique de planification spatiale préventive, en amont des projets, et contribuent à une sélection d'emplacements plus compatibles avec les objectifs de conservation de la biodiversité. Les zones dites « à fort enjeu » sont généralement définies comme des secteurs abritant une forte densité d'individus ou des habitats critiques pour certaines espèces sensibles. Cela inclut les aires de rassemblement pour les espèces migratrices, les colonies de reproduction, les sites de nourrissage et de repos. S'ajoutent aussi des zones écologiquement sensibles comme les habitats peu perturbés, les eaux peu profondes, les zones proches du littoral ou riches en proies (Gulka et al., 2024 ; Abramic et al., 2022).

Parmi les recommandations figurent ainsi l'évitement de l'installation de parcs entre des zones de repos et d'alimentation (Hüppop et al., 2006), ou au sein de centres d'activité aviaire reconnus, notamment pour les espèces d'oiseaux de rivage ou d'eau douce dépendantes de ces zones pour leur survie (Watts et al., 2022). Dans certains cas, les habitats prioritaires sont protégés réglementairement, comme c'est le cas des « zones importantes pour la conservation des oiseaux (ZICO) » ou « Important Bird Areas (IBAs) » ou autres désignations nationales et européennes de conservation (Gulka et al., 2024).

La distance par rapport au rivage est également souvent utilisée comme indicateur indirect d'enjeu écologique, en particulier pour les chauves-souris migratrices, dont l'activité décroît avec l'éloignement des côtes. Cela justifie des recommandations visant à éviter les implantations trop proches du littoral, qui combinent généralement une forte activité de vol avec des densités de proies plus importantes, notamment d'insectes (Brabant et al., 2021 ; Oneil, 2020).

Cette exclusion optimise dès l'amont les arbitrages spatiaux entre production énergétique et conservation. Elle permet de réduire la probabilité de conflits écologiques majeurs, en combinant les données écologiques existantes avec les contraintes techniques et économiques de l'implantation. L'objectif est de réduire le besoin de mesures correctrices coûteuses (comme le bridage ou la compensation), en s'appuyant sur une logique de « zonage évitant » dans les phases de prospection (Croll et al., 2022).

Outre l'exclusion stricte, on peut instaurer des zones tampons de sécurité autour des habitats sensibles ou des zones d'activité aviaire élevée. Les zones tampons s'appliquent en périphérie de ces zones sensibles, dans une logique de précaution et d'atténuation graduelle du risque. Cette approche permet de réduire les effets de bord et de tenir compte de la mobilité des espèces et de la variabilité spatiale de leurs usages.

Plusieurs auteurs proposent d'ajuster les distances minimales d'implantation en fonction des espèces ciblées et des usages écologiques des territoires concernés. Par exemple, Nebel et al. (2024) suggèrent d'élargir significativement le rayon de protection autour des sites de reproduction des aigles à queue blanche, en préconisant une zone tampon de plus de 5 km. Cette distance, supérieure à la norme actuelle de 2 km adoptée en Finlande, permettrait de mieux couvrir les aires de chasse et de réduire la probabilité de collision dans la périphérie des zones de nidification. L'étude souligne que cette mesure permettrait de mieux concilier les exigences de conservation d'espèces à large domaine vital avec les contraintes d'aménagement du territoire.

De leur côté, Brabant et al. (2021) mettent en évidence un déclin marqué de l'activité des chauves-souris migratrices avec la distance à la côte. Cette relation négative entre la distance au rivage et la fréquence des détections est présentée comme un outil pratique pour guider le choix de localisation des parcs éoliens marins, en particulier dans les premières phases de planification. Éloigner les installations des zones côtières permettrait non seulement de limiter l'exposition des chauves-souris, mais également de réduire les impacts sur les oiseaux côtiers, tout en maintenant une cohérence avec d'autres usages maritimes (navigation, pêche). Gulka et al. (2024) précisent que ces zones peuvent être définies à partir de différents critères écologiques, tels que la proximité de colonies nicheuses, de gîtes de chauves-souris, ou encore d'aires d'alimentation utilisées intensément. Ils insistent sur l'importance d'un paramétrage flexible et contextuel des zones tampons, en fonction des espèces, des périodes critiques (nidification, migration), et de la configuration locale des habitats.

Configuration des éoliennes au sein des parcs (micro-siting)

La mesure de micro-siting, ou optimisation spatiale des turbines à l'échelle du parc, vise à réduire les impacts des parcs éoliens en mer sur l'avifaune et les chauves-souris en ajustant l'agencement interne des turbines. Contrairement à la planification à grande échelle, qui détermine la localisation générale des projets (macro-siting), le micro-siting se concentre sur l'architecture du parc éolien lui-même : disposition, orientation, espacement des turbines et conservation de corridors de vol. Deux leviers complémentaires se dégagent : (i) capitaliser d'abord sur les données empiriques pour caractériser

l'usage de l'espace par la faune, puis (ii), sur la base de ces connaissances, organiser l'espace interne du parc de manière à réduire les interactions à risque.

Un premier prérequis souligné est l'amélioration des données empiriques post-construction, actuellement insuffisantes pour évaluer les effets réels des configurations de turbines sur la faune volante. Ce déficit empêche une rétroaction efficace dans les projets suivants. Un suivi ciblé s'impose pour combler ces lacunes et alimenter des stratégies de micro-siting basées sur des preuves concrètes (Masden et al., 2012). Les modèles de mouvement aviaire sont présentés comme des outils particulièrement prometteurs dans ce contexte. Ils permettent de simuler, dès la phase de planification, la probabilité de passage des oiseaux à travers différentes configurations spatiales de turbines, et donc de réduire le risque de collision. Ces modèles exploitent les données issues des études d'impact pour anticiper les effets de l'espacement entre turbines, de la forme globale du parc, et même de la direction des vents (Masden et al., 2012). Une telle approche permet d'intégrer une composante comportementale et écologique directement dans le design du parc. Une fois les données et les modèles posés, la question se déplace vers l'organisation physique du parc.

La préservation des couloirs de migration, à l'échelle intra- ou inter-parc, constitue une recommandation récurrente. Plusieurs auteurs s'accordent sur l'importance de maintenir des zones non équipées « free corridors » de plusieurs kilomètres de large entre ou à l'intérieur des parcs afin de garantir un passage sûr pour les espèces migratrices (Hueppop et al., 2006 ; Goodale et Milman, 2020 ; Gorman et al., 2023). Ces corridors permettent de limiter les effets cumulés de barrière à grande échelle, en particulier lorsque l'implantation dans une voie migratoire est inévitable. Une attention particulière doit être portée à l'espacement entre les blocs de turbines, qui contribue à la perméabilité du paysage marin pour les espèces en déplacement. À ce titre, concevoir plusieurs petits parcs séparés plutôt qu'un unique parc dense pourrait réduire les risques d'obstruction du passage (Masden et al., 2012).

Côté design interne du parc, il est conseillé d'aligner les turbines parallèlement à la direction principale des flux migratoires, ou orientées pour que les alignements d'éoliennes ne soient pas perpendiculaires aux principales trajectoires de vol, ce qui accentuerait les effets de barrière (Hueppop et al., 2006 ; Abramic et al., 2022). Une telle configuration permet de faciliter l'évitement des structures par les oiseaux et les chauves-souris, tout en maintenant des corridors intégrés. Cette recommandation relève du micro-siting : elle concerne l'orientation des turbines à l'intérieur d'un site déjà sélectionné. D'autres aspects du design concernent la densité et l'espacement des turbines. Augmenter la distance entre les rangées de turbines dans la direction des vents dominants, notamment lorsqu'elle coïncide avec la direction de migration, ouvre des fenêtres de passage moins contraignantes pour les animaux volants (Gulka et al., 2024). Le positionnement doit également prendre en compte les trajectoires journalières entre les sites de nidification, de nourrissage ou de repos afin de ne pas intercepter des flux réguliers. En parallèle, le nombre total de turbines, leur distribution au sein de l'aire marine et leur configuration (clusterisée ou dispersée) influencent la perception visuelle et acoustique du parc par la faune, et donc son comportement d'approche ou d'évitement. Les stratégies de micro-siting doivent s'appuyer sur une connaissance approfondie des habitudes de vol locales et régionales, en intégrant notamment les résultats des suivis télémétriques et acoustiques.

Ce qu'il faut retenir ...

*La **planification spatiale des parcs éoliens marins** constitue un levier majeur pour prévenir les impacts écologiques sur les oiseaux marins et les chauves-souris migratrices. L'ensemble des travaux examinés converge vers une approche à la fois précautionneuse, fondée sur les données et collaborative.*

*Cette planification repose sur plusieurs piliers complémentaires. D'abord, **l'acquisition et le partage de données robustes** forment le socle pour alimenter des décisions de localisation fondées. Ils reposent sur des études ciblées, des protocoles de suivi standardisés et des plateformes collaboratives ouvertes. Ensuite, les **outils d'évaluation d'impact**, qu'ils soient cartographiques, statistiques ou*

modélisés, permettent de projeter les risques de manière prospective et d'identifier les zones de plus haute vulnérabilité pour la faune volante. La **localisation stratégique des projets**, incluant l'exclusion des zones sensibles, la création de zones tampons, et le respect des corridors migratoires, renforce cette logique de prévention. Enfin, à une échelle plus fine, le **micro-siting** permet d'ajuster la configuration interne des parcs afin d'améliorer leur perméabilité écologique tout en optimisant leur efficacité énergétique.

Ce cadre spatial ne peut toutefois être efficace sans une **coordination transnationale, un engagement multipartite et une adaptation continue** fondée sur les retours d'expérience et l'évolution des connaissances. Face à l'essor rapide de l'éolien offshore et à la complexité des dynamiques écologiques marines, la planification spatiale apparaît non comme une simple étape technique, mais comme une démarche intégrée, à la croisée de la science, de la gouvernance environnementale et de l'aménagement durable du territoire maritime.

Planification temporelle

La planification et l'évitement temporel consistent à organiser les activités perturbantes, telles que la construction, la maintenance ou les déplacements réguliers de navires, afin d'éviter les périodes critiques pour les espèces sensibles comme les oiseaux marins et les chauves-souris.

Les recommandations de Perrow et al. (2011) trouvent leur origine dans une étude de terrain réalisée à proximité d'une colonie majeure de Sternes naines (*Sternula albifrons*). La construction d'un parc éolien offshore a coïncidé avec une chute marquée de l'abondance de harengs juvéniles, proies principales des poussins. Cette baisse, non expliquée par les conditions environnementales, est attribuée au battage des pieux pendant la fraie hivernale, entraînant une réduction du succès de chasse et des perturbations de reproduction au sein de la colonie. En réponse, les auteurs appellent à adopter une approche de précaution dans le calendrier et la durée du battage de pieux, accompagnée d'un suivi écologique ciblé à long terme. Ces recommandations ont depuis inspiré la littérature pour soutenir une planification saisonnière des activités les plus intrusives. Plus largement, Gulka et al. (2024) précisent que la planification doit prendre en compte non seulement la reproduction, mais aussi la migration et l'hivernage, selon les espèces présentes et les spécificités du site. Il est aussi recommandé d'ajuster les périodes de circulation des navires de maintenance et des hélicoptères, qui peuvent également provoquer des perturbations comportementales significatives. Croll et al. (2022) ajoutent que réduire l'intensité des activités ou en ajuster la temporalité peut aider à atténuer certains effets de déplacement de la faune sensible.

En somme, cette mesure repose sur des bases écologiques avérées et une logique de précaution. Toutefois, sa mise en œuvre nécessite une connaissance fine des dynamiques spatio-temporelles des espèces concernées, appuyée par des programmes de suivi robustes. Ceux-ci restent pourtant limités en milieu marin.

Rare cas de retour d'expérience :

Dans le parc éolien offshore de Kentish Flats, au Royaume-Uni, une unique mesure de réduction ciblant l'avifaune a été mise en œuvre : elle consistait à planifier les phases de chantier en dehors de la période de forte concentration des plongeurs (Kentish Flats Ltd, 2007 ; Office français de la biodiversité & Biotope, 2025). Selon les auteurs, cette organisation temporelle a permis d'éviter toute interférence notable avec ces espèces, les opérations de battage des pieux et de mise en place des turbines ayant été menées en dehors de l'hivernage. Les suivis post-installation, réalisés par observation en mer et par voie aérienne, n'ont mis en évidence aucun impact durable sur les effectifs d'oiseaux. Il en a été conclu que cette stratégie, reposant sur un ajustement calendaire des travaux, avait permis d'éviter la perturbation des plongeurs présents sur la zone.

Ce qu'il faut retenir ...

*La **planification temporelle** est une mesure d'atténuation pragmatique, complémentaire de la planification spatiale. Fondée sur les rythmes biologiques des espèces sensibles, elle permet d'ajuster le calendrier des phases les plus intrusives des projets pour en limiter l'impact.*

Les données disponibles montrent que des perturbations durant des périodes critiques peuvent engendrer des effets écologiques notables, comme une baisse du succès reproducteur ou une modification des comportements de recherche alimentaire. En réponse, une temporalisation raisonnée des interventions apparaît comme un levier de prévention prometteur. Elle suppose une connaissance fine des espèces locales et un suivi écologique rigoureux.

Bridage des turbines

Les mesures de bridage constituent l'un des principaux leviers opérationnels évoqués pour diminuer l'impact des parcs éoliens offshore sur les oiseaux marins et les chauves-souris migratrices. Ces mesures, qui consistent à ajuster ou interrompre temporairement l'activité des éoliennes selon des conditions spécifiques ou à des périodes précises, sont perçues par la communauté scientifique comme le principal levier d'atténuation opérationnelle une fois que l'évitement par la planification spatiale (considéré comme la première ligne de défense) n'a pas suffi à écarter tous les risques. Toutefois, la mise en œuvre de ces mesures opérationnelles nécessite une connaissance approfondie des comportements migratoires et de la répartition spatio-temporelle des espèces concernées, ainsi que des conditions environnementales influençant directement les risques de collision.

Recherche comportementale et suivi spécifique au site

Les recommandations concernant la recherche comportementale et le suivi spécifique au site représentent un préalable à l'élaboration et à l'application de mesures efficaces de bridage des turbines éoliennes.

Machado et al. (2024) soulignent dans leur revue l'importance d'un suivi approfondi et continu des comportements des oiseaux migrateurs en mer, incluant leurs schémas d'activité, leurs trajectoires et leurs réactions face aux éoliennes. Ils recommandent une collecte systématique de données comportementales détaillées, qui serviront de socle à l'élaboration de stratégies de bridage adaptatives, ajustées aux particularités migratoires et comportementales des oiseaux concernés. Ces données devraient idéalement couvrir l'ensemble des pays impliqués dans les projets éoliens offshore.

L'objectif est de développer une compréhension intégrée des schémas migratoires à l'échelle régionale ou internationale.

Le suivi spécifique à chaque site d'installation est considéré comme une étape fondamentale par True et al. (2023), notamment en ce qui concerne les chauves-souris migratrices. Ces auteurs préconisent que les gestionnaires des parcs éoliens marins mettent en place des protocoles d'observation spécifiques à chaque site afin de mieux comprendre les risques réels de collision et de mortalité pour les espèces concernées. Selon ces auteurs, les chauves-souris migratrices pourraient montrer des taux de fréquentation très variables d'un site à l'autre, en particulier lorsqu'on compare les installations offshore aux installations terrestres classiques. Ainsi, une surveillance initiale précise permettrait aux gestionnaires de cibler les périodes critiques de présence des chauves-souris et d'éviter un bridage inutile ou inefficace des turbines, en optimisant l'efficacité économique et écologique de cette mesure.

La complémentarité de ces deux approches (recherche comportementale et suivi site-spécifique) réside dans leur capacité à fournir des données robustes et précises, indispensables pour calibrer les mesures de bridage. En effet, sans une bonne connaissance préalable des comportements migratoires et des niveaux réels d'activité au niveau local, il devient difficile d'identifier les conditions météorologiques ou temporelles qui nécessiteraient une limitation du fonctionnement des turbines. Cibler les situations où les oiseaux ou chauves-souris sont réellement exposés à un risque de collision, non seulement améliore l'efficacité de la conservation des espèces, mais aussi évite les pertes énergétiques et économiques liées au bridage inutile.

Augmentation de la vitesse de seuil de démarrage

L'augmentation de la vitesse minimale du vent nécessaire pour mettre en rotation les pales des éoliennes (dite « vitesse seuil de démarrage » ou « cut-in speed ») est une mesure opérationnelle proposée pour diminuer les risques de collision des chauves-souris migratrices avec les éoliennes offshore.

Dans une étude menée en mer du Nord (Brabant et al., 2021), la majorité de l'activité des chauves-souris migratrices (61 à 70 % selon les sites) se produisait à des vitesses de vent inférieures à la vitesse seuil typique de démarrage des éoliennes offshore (généralement autour de 3 à 4 m/s). Une augmentation modérée de ce seuil à environ 5 m/s réduirait les risques de collision, puisque jusqu'à 80 % de l'activité migratoire surviendrait lorsque les pales des éoliennes seraient à l'arrêt. Les auteurs recommandent également une gestion flexible de cette mesure, en fonction d'autres paramètres environnementaux tels que la température ambiante nocturne. En effet, cette stratégie pourrait être levée par exemple quand les températures nocturnes descendent en dessous de 13°C, périodes durant lesquelles l'activité des chauves-souris diminue significativement. Ce type d'approche permettrait ainsi une réduction notable des collisions à un coût économique minimal pour les producteurs d'énergie éolienne offshore.

True et al. (2023) abondent dans le même sens : relever le seuil de vitesse du vent pour le démarrage des turbines constitue une solution opérationnelle potentiellement efficace pour réduire les collisions des chauves-souris migratrices offshore, de manière comparable aux résultats obtenus dans les installations éoliennes terrestres. Selon leurs observations, la plupart des collisions surviennent par conditions de faible vent, températures élevées et bonne visibilité—conditions propices à l'application d'une telle mesure de bridage. Ils préconisent donc des seuils de vent plus élevés dans les parcs éoliens marins pour réduire significativement les risques, tout en notant que les pertes économiques devraient rester limitées grâce à la nature intermittente de l'activité migratoire des chauves-souris.

Enfin, Gulka et al. (2024) confirment également cette recommandation, notant que l'augmentation de la vitesse seuil de démarrage des éoliennes marines constitue une mesure d'atténuation souvent évoquée dans la littérature comme étant potentiellement efficace pour réduire les collisions avec les chauves-souris migratrices. Par ailleurs, cette mesure a prouvé son efficacité en condition terrestre.

Ces différentes références indiquent clairement que l'augmentation de la vitesse seuil de démarrage constitue une mesure opérationnelle réaliste et prometteuse pour la protection des chauves-souris migratrices en contexte marin, sous réserve d'une adaptation aux conditions spécifiques locales et d'une intégration optimale avec d'autres paramètres environnementaux clés (température, saison, conditions météorologiques). Elles soulignent néanmoins la nécessité de validations plus étendues, menées directement sur des installations marines en conditions réelles, afin de confirmer pleinement l'efficacité de cette stratégie.

Bridage saisonnier

Le bridage saisonnier consiste à suspendre ou à limiter le fonctionnement des turbines durant des périodes précises, par exemple, lorsque la migration des oiseaux est particulièrement intense, et lorsque la probabilité de collision est la plus élevée.

Plusieurs études récentes soutiennent la pertinence écologique de cette approche. L'analyse de la migration du Courlis cendré (*Numenius arquata*) a démontré qu'une proportion importante des individus traverse les zones de parcs éoliens offshore à l'altitude balayée par les pales (Schwemmer et al., 2023). Leur risque de collision est nettement plus élevé en automne qu'au printemps. Les auteurs recommandent donc le bridage des éoliennes durant les périodes migratoires automnales les plus intenses. Reid et al. (2023) corroborent que l'ajustement saisonnier des opérations de bridage des éoliennes pourrait être une mesure efficace de réduction des collisions, à condition d'aligner ces arrêts sur les périodes critiques identifiées par un suivi. La capacité à identifier quand et où ces périodes de risque élevé surviennent est ainsi essentielle pour mettre en place des mesures saisonnières pertinentes et ciblées. Dans la revue de Gulka et al. (2024), plusieurs études suggèrent que l'arrêt saisonnier des turbines pendant des périodes de risque élevé, telles que les pics migratoires, pourrait diminuer les taux de mortalité de certaines espèces d'oiseaux. Enfin, Watts et al. (2022) les installations éoliennes offshore déjà construites ou autorisées, le bridage saisonnier (ainsi que des restrictions horaires ponctuelles) représente la principale option opérationnelle disponible pour atténuer les risques de collision.

Ces références indiquent unanimement que le bridage saisonnier est une mesure opérationnelle potentiellement efficace, même si démontrée dans un contexte d'éolien terrestre. Son efficacité repose toutefois sur une identification fine des périodes migratoires critiques, laquelle est rendue complexe par le décalage temporel entre espèces — d'où l'importance de déterminer clairement les espèces prioritaires à protéger et de procéder à des suivis écologiques réguliers et approfondis sur les sites concernés.

Bridage adaptatif et intelligent basé sur des conditions spécifiques, des approches prédictives ou de la détection directe

Les mesures de bridage adaptatif et intelligent s'appuient sur les conditions météorologiques, la détection directe des animaux, les périodes de migration aviaire intense identifiées grâce à un suivi en temps réel, ou encore sur des modèles prédictifs de leur présence. Elles sont fréquemment proposées pour réduire les collisions avec les oiseaux marins et les chauves-souris migratrices. Ces stratégies reposent souvent sur des approches technologiques dynamiques, visant à ajuster le fonctionnement des éoliennes en temps réel ou à anticiper leur arrêt en fonction de la présence avérée ou prévue des espèces sensibles.

Certaines conditions météorologiques (faible visibilité, précipitations, vent fort) influencent la capacité des oiseaux à détecter et éviter les éoliennes offshore (Grover, 2023 ; Schwemmer et al., 2023). Schwemmer et al. (2023) recommandent d'approfondir les analyses comportementales liées aux conditions météorologiques, afin de cerner les moments de plus grande vulnérabilité chez les oiseaux. Grover (2023) insiste également sur l'importance de bien comprendre les conditions de visibilité particulières aux zones éoliennes offshore pour que ces données guident systématiquement le bridage.

Le bridage intelligent basé sur des modèles prédictifs repose sur des données environnementales pour prévoir la présence des animaux dans la zone des turbines. Des systèmes de surveillance continus (radars, capteurs acoustiques) couplés à des données météorologiques peuvent être utilisés pour anticiper les périodes à haut risque de collision, telles que les nuits de forte migration en conditions défavorables (Hueppop et Hilgerloh 2012; Hueppop et al., 2006). Aux Pays-Bas, un protocole a été développé pour les éoliennes offshore en Mer du Nord, utilisant des modèles prédictifs s'appuyant sur des données radar et météorologiques pour déclencher le bridage préventif des turbines (Walsh et al., 2024). Ce modèle devrait gagner en précision avec l'intégration progressive de nouvelles données au fil du temps. Le principal défi, selon Brabant et al. (2021), est d'avertir les exploitants 24 à 48 h à l'avance pour qu'ils planifient le bridage sans perturber le réseau, d'où l'importance de modèles robustes. True et al. (2023) ainsi que Weiser et al. (2024) rappellent que ces modèles prédictifs doivent intégrer température, vitesse du vent et visibilité pour cibler les périodes de risque élevé. Gulka et al. (2024) soulignent également le fort potentiel de cette approche pour les chauves-souris migratrices, en intégrant notamment des seuils de vitesse du vent et de température pour minimiser les pertes économiques tout en maximisant la protection des animaux.

L'évaluation des risques couplée au bridage adaptatif utilise une surveillance continue du risque de collision et la mise en place de mesures adaptatives de bridage lorsque les risques augmentent, permettant une réponse flexible (Gorman et al., 2023). Cette approche est actuellement mise en œuvre aux Pays-Bas pour les oiseaux migrateurs (Bradaric et al. 2024). Dans leur article, les auteurs décrivent comment des arrêts ciblés sont déclenchés par des prévisions précises des flux migratoires d'oiseaux durant les nuits de migration intense, suivant une méthode déjà éprouvée par l'aviation militaire. Elle exige toutefois de connaître, heure par heure, l'altitude des vols — paramètre dicté par le vent et le moment de la nuit — afin de choisir précisément la fenêtre d'arrêt. Ainsi, améliorer la connaissance des schémas de migration permet de diminuer le risque de bridages inutiles, tout en maximisant la protection effective des oiseaux. De leur côté, Bach et al. (2022) soulignent l'importance des arrêts ciblés pour les chauves-souris migratrices. Un suivi précis de l'activité des chauves-souris à hauteur des nacelles et dans la partie inférieure de la zone balayée par les pales permettrait d'établir les périodes nécessitant un bridage ponctuel. Bien que cette stratégie soit déjà mise en œuvre dans certaines régions offshore, telles que les côtes néerlandaises et certaines parties des eaux côtières allemandes, les auteurs plaident pour une généralisation plus large de ces mesures dans toute la mer du Nord et la mer Baltique. Leur étude révèle que les chauves-souris migratrices ne sont généralement actives que durant quelques nuits par an, souvent associées à des vents faibles.

Le bridage intelligent basé sur la détection directe repose sur des systèmes automatisés capables de détecter en temps réel la présence d'oiseaux ou de chauves-souris, déclenchant immédiatement l'arrêt temporaire des turbines. Willmott et al. (2015) présentent un outil (ATOM) capable de transmettre en temps réel des informations précises sur la densité, la hauteur et la trajectoire des vols d'oiseaux et de chauves-souris, afin d'alimenter directement des stratégies de bridage dynamique. Le recours à des systèmes de détection automatisée ou à des observateurs humains est déjà mis en œuvre sur certains parcs terrestres. Ainsi, Nebel et al. (2024) montrent que ce dispositif protège efficacement les aigles à queue blanche en stoppant les turbines dès qu'un individu est détecté dans leur voisinage immédiat. De façon générale, il est considéré comme une approche efficace pour des espèces menacées, notamment lorsqu'un arrêt rapide et ponctuel des turbines peut éviter une collision sans compromettre notablement la production énergétique (Croll et al., 2022). Ces auteurs soulignent la pertinence d'adapter ces dispositifs au contexte marin. Bien que leur transposition offshore pose des défis techniques, notamment liés aux conditions météorologiques et à la maintenance, des systèmes de bridage ciblé, déjà fonctionnels à terre, pourraient être ajustés pour répondre aux spécificités du milieu marin à condition qu'ils soient correctement adaptés (Reid et al., 2023). Les contraintes également liées à la taille plus imposante des éoliennes en mer accentuent encore les difficultés, en limitant la réactivité des systèmes de bridage et en augmentant les risques mécaniques associés aux arrêts répétés.

Machado et al. (2024) insistent dans leur revue sur l'importance d'améliorer continuellement les procédures de bridage afin de maintenir un équilibre optimal entre la protection des oiseaux marins

et la maximisation de la production énergétique des éoliennes. Cette optimisation continue implique un ajustement régulier des stratégies en fonction des nouvelles données recueillies, des avancées technologiques et des retours d'expérience terrain.

Ces types de bridage partagent une même logique opérationnelle basée sur une adaptation dynamique et prédictive aux conditions réelles ou anticipées, visant une protection efficace tout en réduisant autant que possible les pertes énergétiques. Elles mettent en avant la nécessité d'une approche intégrée et adaptative, combinant surveillance technologique avancée, modèles prédictifs robustes et ajustements continus des stratégies.

Collaboration et gestion intégrée

La réduction efficace des impacts des parcs éoliens offshore sur les espèces migratrices dépend fortement d'une approche collaborative et intégrée, incluant le partage transparent des données, la coopération entre acteurs transnationaux et multipartites, ainsi que la standardisation des procédures et des protocoles opérationnels. Une récente revue de la littérature met en avant ces stratégies pour la gestion durable des impacts sur la biodiversité volante (Gulka et al. 2024).

Le partage actif et systématique des données entre les parties prenantes (exploitants de parcs éoliens, autorités environnementales, instituts de recherche, etc.) constitue un élément clé pour mieux comprendre les dynamiques migratoires des oiseaux et des chauves-souris à l'échelle des régions maritimes. Machado et al. (2024) recommandent d'encourager ce partage de données afin d'enrichir la connaissance des schémas migratoires et faciliter ainsi la mise en œuvre coordonnée de mesures de bridage. Une telle démarche permet de mutualiser les connaissances et de disposer d'un corpus robuste de données à jour, essentiel à la prise de décisions informées et cohérentes.

La mise en place d'une coopération transnationale et multipartite efficace entre les différents acteurs concernés—incluant gouvernements, gestionnaires de parcs éoliens, ONG, chercheurs et opérateurs des réseaux électriques—constitue une autre de leur recommandation centrale. La création d'un comité spécifique rassemblant des représentants de chaque pays impliqué dans le développement éolien marin est proposée pour coordonner les stratégies de bridage à l'échelle régionale, superviser leur mise en œuvre opérationnelle, surmonter les difficultés potentielles et garantir l'adhésion à des protocoles partagés. En complément, ils ajoutent la formation de groupes de parties prenantes élargis, afin de favoriser le consensus, renforcer la responsabilité partagée et optimiser l'efficacité des stratégies d'atténuation adoptées.

Afin d'assurer une efficacité maximale et une cohérence opérationnelle à l'échelle régionale et internationale, il apparaît essentiel d'établir des protocoles et procédures standardisés de bridage librement accessibles. Machado et al. (2024) proposent ainsi la mise en place de règles claires et adaptées aux conditions locales spécifiques, sur la base des connaissances disponibles et des recommandations issues des études précédentes. Ces protocoles doivent être régulièrement mis à jour en fonction des retours d'expérience et des avancées scientifiques, et clairement communiqués à toutes les parties prenantes afin de garantir une approche homogène et coordonnée à grande échelle. La coopération internationale est également indispensable afin d'assurer une harmonisation des procédures au-delà des frontières nationales, facilitant ainsi l'échange des meilleures pratiques et la mise en place de standards cohérents pour la protection des espèces migratrices en milieu offshore. Bien que la standardisation des protocoles soit essentielle pour assurer la cohérence des mesures à une large échelle géographique, une adaptation régionale précise des calendriers d'application est également requise. En effet, les périodes critiques de migration et les dynamiques saisonnières peuvent varier fortement selon les régions et les espèces concernées. Par conséquent, les règles et procédures de bridage standardisées doivent être suffisamment flexibles pour permettre une adaptation régionale, afin de maximiser leur pertinence écologique tout en conservant une cohérence générale à l'échelle internationale.

Ce qu'il faut retenir ...

*Les différentes **stratégies de bridage** évoquées dans la littérature scientifique, qu'elles soient générales ou ciblées, adaptatives ou prédictives, apparaissent comme des outils indispensables pour diminuer efficacement les effets des parcs éoliens offshore sur la biodiversité volante. Toutefois, leur succès opérationnel exige une connaissance approfondie des comportements des espèces ciblées, ainsi qu'une évaluation rigoureuse et continue de leur efficacité en contexte réel. Pour cela, trois conditions sont nécessaires : 1) déployer des technologies de détection de dernière génération; 2) généraliser les suivis comportementaux et environnementaux spécifiques aux sites d'installation ; 3) instaurer une gestion intégrée et collaborative à l'échelle régionale et internationale. À terme, ces approches permettront non seulement une réduction significative des risques écologiques associés à l'éolien marin, mais également une meilleure acceptabilité sociale et économique de ces projets dans une perspective de durabilité à long terme.*

Visibilité des turbines

Améliorer la visibilité des éoliennes pour la faune volante comprend diverses approches qui rendent les structures plus détectables, via la gestion de l'éclairage, la conception des pales, la peinture ou encore la modification des dimensions des turbines. Leur efficacité réelle dans le contexte de l'éolien marin demeure peu documentée, bien que certaines stratégies aient prouvé leur potentiel à terre ou sur d'autres infrastructures en mer.

Gestion de l'éclairage

L'éclairage des éoliennes offshore sert principalement à assurer la sécurité maritime et aérienne, mais peut également attirer des espèces nocturnes, en particulier pendant les périodes de migration ou lors de conditions météorologiques défavorables (brouillard, pluie intense). Cette attraction augmente les risques de collisions, de désorientation et d'épuisement des oiseaux migrateurs (Rebke et al., 2019 ; Hueppop et al., 2006 ; Croll et al., 2022).

L'une des approches les plus fréquemment recommandées consiste à réduire au strict nécessaire l'éclairage artificiel des structures offshore. Cette réduction peut être obtenue en limitant le nombre de lumières installées, leur intensité lumineuse, ou encore la durée pendant laquelle elles restent allumées (Rebke et al., 2019 ; Gulka et al., 2024 ; Grover, 2023). Walsh et al. (2024) soulignent que les autorités allemandes recommandent la mise en place d'éclairages actifs uniquement lorsque indispensable (par exemple en cas d'approche d'un avion ou d'un navire), réduisant ainsi considérablement l'exposition lumineuse nocturne continue des oiseaux et chauves-souris.

L'adoption de systèmes automatisés appelés Aircraft Detection Lighting Systems (ADLS) ne déclenchant l'éclairage des turbines qu'en présence avérée de trafic aérien, évite aussi l'éclairage continu inutile. Cette approche est mise en avant par Gulka et al. (2024) et a été rendue obligatoire pour tous les futurs parcs éoliens commerciaux marins aux États-Unis. Un principe similaire peut être appliqué pour les lumières de navigation maritimes situées à la base des turbines, afin de limiter leur activation aux périodes où la visibilité est fortement réduite (Rebke et al., 2019).

La nature du signal lumineux joue également un rôle déterminant dans l'attractivité pour les oiseaux. Plusieurs études concluent que les lumières intermittentes ou clignotantes attirent moins les oiseaux migrateurs que les lumières fixes (Hueppop et al., 2006 ; Rebke et al., 2019 ; Gulka et al., 2024 ; Croll et al., 2022). Des tests en contexte terrestre montrent que l'utilisation de lumières intermittentes avec des fréquences basses et des intervalles prolongés entre chaque flash est particulièrement bénéfique pour réduire les collisions avec les oiseaux (Gulka et al., 2024). En revanche, les lumières stroboscopiques très rapides sont à éviter en raison de leur faible efficacité et des effets potentiels sur les humains (éblouissement, désorientation des opérateurs maritimes).

Une gestion adéquate de l'orientation de l'éclairage (« down-shielding ») est aussi recommandée. Diriger les faisceaux lumineux exclusivement vers le bas permet de minimiser leur dispersion dans l'environnement marin, limitant ainsi l'attraction des oiseaux migrateurs depuis de longues distances (Grover, 2023 ; Croll et al., 2022). Cette mesure pratique est particulièrement pertinente pour l'éclairage de sécurité sur les plateformes et les ponts des installations offshore. Cependant, les feux aéronautiques réglementaires destinés au trafic aérien restent soumis à des normes strictes qui devraient laisser peu de marge de manœuvre pour l'application de cette mesure.

La couleur des lumières constitue un paramètre qui influence fortement l'attraction. Des études européennes indiquent que les lumières blanches sont fortement attractives pour les oiseaux migrateurs nocturnes (Gulka et al., 2024 ; Rebke et al., 2019). Plusieurs travaux expérimentaux (notamment réalisés aux Pays-Bas) ont testé différentes couleurs alternatives : les lumières rouges, vertes ou bleues ont généralement attiré moins d'oiseaux que les lumières blanches (Gulka et al., 2024). D'autres études aux États-Unis ont montré que des lumières rouges intermittentes attirent beaucoup moins les oiseaux que les lumières rouges fixes (Gulka et al., 2024). Toutefois, des divergences persistent dans la littérature, certaines études suggérant que les lumières vertes ou bleues seraient moins perturbantes, alors que d'autres concluent à une moindre attractivité du rouge (Gulka et al., 2024). Ainsi, le choix optimal de la couleur demeure encore à préciser, pouvant varier selon les espèces et les contextes météorologiques.

Les auteurs s'accordent sur l'importance d'éviter l'utilisation intensive de lumière artificielle puissante (« flood lighting ») dans les parcs éoliens offshore. Ces éclairages à forte intensité peuvent provoquer des phénomènes massifs d'attraction d'oiseaux en période de migration nocturne et par mauvais temps, générant des collisions multiples ou des phénomènes de désorientation graves (Hueppop et al., 2006 ; Gulka et al., 2024 ; Croll et al., 2022).

Enfin, une recommandation vise à restreindre l'éclairage aux seules turbines périphériques d'un parc éolien, réduisant ainsi considérablement la surface globale éclairée et limitant l'impact environnemental global sur la faune volante (Gulka et al., 2024). Cette pratique, relativement simple à mettre en œuvre, permettrait de réduire efficacement l'exposition lumineuse totale.

Design des pales du rotor

Une étude récente suggère que le design des pales pourrait jouer un rôle dans la réduction des collisions, notamment chez les grands rapaces, tel que le Pygargue à queue blanche. La modification du profil ou de la géométrie des pales pourrait améliorer leur détection visuelle et modifier le comportement d'approche (Nebel et al., 2024).

Peinture de la turbine

L'amélioration de la visibilité des éoliennes offshore par des modifications visuelles, telles que la peinture des pales et des structures, constitue une mesure fréquemment évoquée dans la littérature pour réduire le risque de collision des oiseaux. Pour les chauves-souris, l'effet serait seulement indirect : la coloration diminuerait l'attraction des insectes, limitant par ricochet la présence des chiroptères à proximité.

La mise en place de motifs fortement contrastés sur les pales et les pylônes des éoliennes peut augmenter leur détectabilité visuelle, principalement par les oiseaux marins. Une revue consacrée aux mesures visuelles pour prévenir les collisions des oiseaux marins avec les éoliennes évoque l'utilisation de motifs achromatiques (noir et blanc) appliqués sur les pales et les mâts (Martin et Banks, 2023). Ces motifs offrent un contraste interne élevé qui reste efficace dans une grande variété de conditions météorologiques et lumineuses, facilitant ainsi leur détection par les oiseaux à une distance suffisante pour permettre une modification de leur trajectoire de vol. Les auteurs insistent sur le fait que ces motifs doivent être intégrés dès la conception ou la fabrication des composants des éoliennes afin de garantir une efficacité maximale et durable, sans perturber les exigences réglementaires existantes concernant la sécurité maritime et aérienne. Ils recommandent ainsi un motif spécifique alternant noir

et blanc sur les pales, ainsi qu'une alternance verticale coordonnée de bandes noires et blanches sur les pylônes, créant un effet de scintillement (« flicker ») très perceptible par les oiseaux. Ces suggestions sont corroborées par Gulka et al. (2024) qui rapportent une étude expérimentale menée en parc éolien terrestre en Norvège. Une étude pilote (May et al., 2020) a rapporté qu'en peignant une seule pale d'éolienne en noir, les collisions aviaires diminuaient d'environ 70 %, l'effet étant particulièrement marqué chez les rapaces. Ce résultat reste toutefois préliminaire : l'essai n'a porté que sur quatre turbines et un site terrestre unique. Des validations supplémentaires sont nécessaires avant de conclure à l'efficacité de la peinture de pales, en particuliers dans le milieu marin. Grover (2023) souligne par ailleurs la nécessité de conduire des études supplémentaires pour déterminer les couleurs et les motifs les plus visibles pour les oiseaux marins dans différentes conditions météorologiques et d'éclairage naturel. Le noir reste à ce jour la teinte qui maximise le contraste avec le ciel et a montré la meilleure efficacité globale pour rendre les pales plus visibles. Néanmoins, l'exploration d'autres couleurs ou pigments réfléchissants demeure un axe de recherche, car la perception chromatique varie d'une espèce à l'autre : certaines ne distinguent pas certaines longueurs d'onde, tandis que d'autres possèdent une vision tétrachromatique incluant l'ultraviolet. L'idée d'utiliser des peintures hautement réfléchissantes, notamment dans le spectre UV, est donc régulièrement avancée (Croll et al., 2022 ; Gulka et al., 2024 ; Grover, 2023). Ce choix resterait toutefois espèce-dépendant : les oiseaux dépourvus de sensibilité aux UV ou à d'autres longueurs d'ondes n'en tireraient aucun bénéfice, et l'approche ne protégerait qu'une fraction des taxons concernés. Toutefois, comme l'indiquent Croll et al. (2022) et Gulka et al. (2024), l'efficacité réelle de l'utilisation de peintures réfléchissantes aux UV sur les éoliennes n'est pas encore clairement démontrée dans les environnements marins, bien que ces peintures aient prouvé leur efficacité dans d'autres contextes comme la prévention des collisions contre les vitres.

Par ailleurs, Gulka et al. (2024) indiquent également que d'autres stratégies, comme la texturisation des pales ou leur peinture en couleurs moins attractives pour les insectes (et donc potentiellement moins attractives pour les chauves-souris), ont été testées expérimentalement à petite échelle en milieu terrestre, avec des résultats mitigés.

Plusieurs auteurs appellent à la conduite d'études expérimentales rigoureuses et soigneusement contrôlées dans des conditions offshore réelles (Martin et Banks, 2023 ; Gulka et al., 2024 ; Grover, 2023). Ces validations expérimentales sont essentielles avant toute généralisation ou recommandation opérationnelle à large échelle, notamment en raison des variations importantes des conditions météorologiques marines, de la diversité des espèces concernées et des contraintes spécifiques de maintenance en mer.

Taille de la turbine

La « taille de la turbine » recouvre en réalité plusieurs caractéristiques physiques distinctes, telles que la hauteur totale de la structure, l'espace libre situé entre la surface de l'eau et le bas du rotor, appelé garde au sol, ainsi que le diamètre du rotor et l'espacement entre les turbines individuelles.

L'augmentation de la hauteur du tirant d'air sous pâles (airgap) vise à protéger les espèces volant à faible altitude, telles que les albatros, les puffins et les pétrels. Reid et al. (2023) indiquent ainsi qu'elle pourrait constituer une solution efficace pour ces groupes d'oiseaux en réduisant directement leur exposition au risque de collision. La construction de turbines offshore plus hautes permettrait un dégagement vertical suffisant au-dessus de la mer pour réduire les risques de collision. Cleasby et al. (2015), quant à eux, recommandent une augmentation spécifique du dégagement minimal des pales des éoliennes de 22 mètres (standard actuel à certains endroits) à au moins 30 mètres au-dessus du niveau de la mer, particulièrement sur des sites identifiés comme présentant un risque élevé de collision. Une autre évolution concerne l'emploi d'éoliennes avec des rotors plus larges, capables de produire davantage d'énergie à l'unité (Abramic et al. 2022). Goodale et Milman (2020) soulignent que le choix de turbines de grande taille nécessite une plus grande distance entre chaque turbine individuelle afin d'éviter des interactions aérodynamiques négatives. Cette caractéristique permet donc une réduction de la densité globale des installations offshore, ce qui pourrait

indirectement diminuer le risque de collision et réduire également le risque de déplacement ou de perturbation des oiseaux marins. Gulka et al. (2024) soulignent que la relation entre la taille des turbines et le risque de collision est complexe et varie selon les contextes et les espèces. Des turbines plus hautes peuvent certes réduire le nombre total de machines nécessaires et donc l'encombrement spatial du parc, mais elles déplacent la zone balayée par les pales vers des altitudes différentes : des espèces qui volaient initialement au-dessus — ou au-dessous — du rotor peuvent alors être exposées, en particulier certains migrateurs haute altitude ou, inversement, des espèces à vol plus bas si la base du rotor est abaissée. L'impact potentiel dépend ainsi non seulement des schémas de vol des espèces présentes, mais aussi des conditions météorologiques locales et du contexte écologique propre au site. Utiliser des modèles de risque de collision afin d'identifier et d'optimiser la taille idéale des turbines minimiserait les impacts sur des espèces particulières. Il est à noter que la validation de ces modèles demeure nécessaire en contexte offshore. Il demeure toutefois difficile de prédire avec précision l'impact du remplacement d'éoliennes existantes par des modèles de plus grande envergure. Le facteur déterminant n'est pas tant le diamètre du rotor que la surface totale qu'il parcourt ainsi que son positionnement dans la colonne d'air, deux éléments essentiels pour apprécier le risque de collision (N. Hette-Tronquart, *communication personnelle*, avril 2025). Un parc réduit à un nombre moindre de turbines ne diminue pas automatiquement ce risque, mais l'effet contraire peut se produire si les nouveaux rotors englobent une aire de rotation plus vaste que ceux des machines précédentes.

Si ces mesures basées sur la modification de la taille et des dimensions des turbines semblent très prometteuses, leur efficacité réelle dans le contexte spécifique de l'éolien marin nécessite toutefois des validations expérimentales complémentaires. Les références disponibles mettent en évidence la variabilité potentielle des résultats en fonction des espèces concernées et des contextes écologiques locaux (Gulka et al., 2024). De plus, la faisabilité technique et économique de l'installation de turbines plus grandes et plus espacées doit être prise en compte, car elle peut poser des défis opérationnels importants en mer, notamment en raison des contraintes techniques et logistiques accrues.

Ce qu'il faut retenir ...

*Les mesures visant à améliorer la **visibilité des éoliennes** reposent sur une logique de précaution et d'anticipation : il s'agit de concevoir des infrastructures plus perceptibles pour les espèces sensibles, en s'appuyant sur une compréhension fine de leur écologie sensorielle et de leurs comportements en vol. Les actions identifiées dans la littérature incluent notamment la gestion de l'éclairage, l'introduction de contrastes visuels marqués, le choix de couleurs moins attractives, ou encore l'adaptation des dimensions physiques des turbines, telles que la garde au sol ou le diamètre du rotor. Ces mesures, en grande partie issues de travaux interdisciplinaires croisant écologie sensorielle, ingénierie et biomécanique du vol, doivent encore faire l'objet de validations empiriques en contexte marin.*

Pour les opérateurs, ces éléments offrent des pistes d'innovation technique compatibles avec les exigences de sécurité et les contraintes réglementaires. Pour les scientifiques, ils ouvrent un champ de recherche appliquée essentiel à l'évaluation des interactions espèces-infrastructures. Pour les décideurs, enfin, ils renforcent l'idée que la conception de parcs éoliens respectueux de la biodiversité passe par une intégration fine des connaissances écologiques dans les choix techniques.

Dans cette perspective, la visibilité des turbines s'impose comme un levier complémentaire de réduction des risques, à considérer en parallèle d'autres mesures plus structurelles comme le micro-siting, le bridage ou la planification spatiale.

Mesures de dissuasion

Il existe peu de recommandations concernant les mesures de dissuasion visant à atténuer les impacts de l'éolien marin sur la faune volante. La plupart des mesures identifiées ne sont mentionnées que brièvement dans des revues de littérature portant sur les impacts potentiels ou les approches envisageable dans le cadre de l'éolien marin. Les efficacités évoquées n'ont été testées que dans des contextes terrestres, soulignant la nécessité de recherches complémentaires spécifiques au milieu marin.

Effarouchement acoustique par ultrason chez les chauves-souris

Les dispositifs ultrasoniques visent à perturber l'écholocation des chauves-souris par diffusion de signaux sonores à haute fréquence, réduisant ainsi leur activité ou leur exposition aux éoliennes. Cette mesure est la plus fréquemment évoquée dans la littérature dans la catégorie « dissuasion ». Des réductions de mortalité allant jusqu'à 64 % par turbine traitée ont été observées à terre, selon certaines études citées (Gulka et al., 2024). Toutefois, ces résultats sont très variables selon les espèces, les années et la technologie utilisée (Solick et Newman, 2021). De plus, les espèces les plus fréquentes en mer, comme la chauve-souris rousse de l'Est, n'ont pas montré de réponse positive aux dispositifs testés (Solick et Newman, 2021). Il est à noter que ces dispositifs présentent une portée limitée et que leur efficacité diminue rapidement avec la distance (Gulka et al., 2024). Malgré des perspectives encourageantes pour certains contextes terrestres, leur transposition en mer reste donc hautement spéculative. Une meilleure compréhension des réponses comportementales des espèces ciblées en environnement marin est indispensable avant d'envisager leur mise en œuvre. Ainsi, O'Neil (2020) recommande de concentrer les efforts de recherche et de financement sur l'amélioration de l'aspect pratique et de l'applicabilité de ces dispositifs.

Effarouchement acoustique chez les oiseaux

L'effarouchement acoustique chez les oiseaux consiste à diffuser des cris d'alarme, de détresse ou de prédateurs spécifiques à certaines espèces (dissuasion bioacoustique), ou des sons synthétiques et impulsifs. Son efficacité reste très variable, dépend fortement des espèces et est sujette à un phénomène d'habituation rapide (Gulka et al., 2024). De plus, des synthèses récentes concluent à une efficacité globalement faible pour empêcher les oiseaux de s'approcher des éoliennes (Croll et al., 2022). Ces méthodes n'ont pas été testées en mer et les réponses spécifiques des oiseaux marins restent largement inconnues, nécessitant des études approfondies sur leur comportement (Croll et al., 2022).

Effarouchement lumineux en lumière UV

L'effarouchement lumineux en lumière ultraviolette (UV) utilise un éclairage UV faible ou clignotant afin de réduire la présence d'oiseaux et de chauves-souris autour des éoliennes. Cette mesure a été mentionnée dans deux revues de littérature scientifique (Solick et Newman, 2021; Gulka et al., 2024). Des tests en milieu terrestre montrent des résultats très variables : certaines études indiquent une réduction notable de l'activité des chauves-souris malgré une augmentation des insectes (leurs proies), tandis que d'autres ne relèvent aucune différence significative de mortalité entre les éoliennes éclairées et celles non éclairées (Solick et Newman, 2021; Gulka et al., 2024). Pour les oiseaux, l'éclairage UV semble réduire efficacement les collisions avec des lignes électriques terrestres, mais il reste nécessaire d'obtenir davantage de données pour confirmer son utilité dans le contexte des éoliennes en mer (Gulka et al., 2024).

Effarouchement lumineux en lumière visible

Les techniques d'effarouchement lumineux en lumière visible incluent des dispositifs tels que des lasers, des lumières stroboscopiques ou des flashes lumineux destinés à éloigner les oiseaux et les chauves-souris des éoliennes. Cette mesure est évoquée dans un seul document. Des études terrestres montrent que ces méthodes peuvent initialement être efficaces, mais que les animaux concernés tendent rapidement à s'y habituer, ce qui en limite la portée sur le long terme (Gulka et al., 2024). En outre, des contraintes réglementaires liées à la sécurité de la navigation rendent difficile leur mise en œuvre dans les environnements marins. À ce jour, aucune donnée spécifique à l'éolien marin n'est disponible pour valider ces dispositifs, ce qui souligne la nécessité de réaliser des études scientifiques ciblées afin d'évaluer leur efficacité dans ce contexte particulier (Gulka et al., 2024).

Dissuasion par revêtement texturé

Le revêtement texturé est une mesure visant à réduire les collisions de chauves-souris en modifiant la surface des pales d'éoliennes pour les rendre moins attractives ou plus détectables par ces animaux. Actuellement, cette technique est en cours de test dans certains contextes terrestres, et des études évaluant son efficacité dans un environnement marin sont fortement encouragées (Solick et Newman, 2021).

Effarouchement par signal électromagnétique chez les chauves-souris

L'utilisation de signaux électromagnétiques vise à perturber le comportement des chauves-souris en émettant des ondes électromagnétiques spécifiques. Cette mesure est évoquée dans une revue de littérature scientifique (Gulka et al., 2024). Des études européennes indiquent une réduction de l'activité des chauves-souris en présence d'ondes électromagnétiques de forte intensité, telles que celles émises par des radars. Toutefois, cette mesure, bien que prometteuse, n'a pas encore été évaluée dans un contexte d'éolien marin, ce qui justifie des recherches complémentaires dans ce domaine (Gulka et al., 2024).

Système anti-perchoir chez les oiseaux marins

Les dispositifs anti-perchoir visent à empêcher les oiseaux marins de se poser et de se percher sur les structures des éoliennes, réduisant ainsi les risques de collision et d'interaction négative. Il est conseillé de les intégrer dès l'installation initiale des turbines (Grover, 2023). Bien que considérée comme potentiellement utile, son efficacité n'a pas été évaluée à ce jour dans le contexte des éoliennes en mer.

Ce qu'il faut retenir ...

Les **mesures de dissuasion** visant à limiter les interactions entre la faune volante et les éoliennes marines restent un champ d'expérimentation peu mature. La plupart des dispositifs identifiés – acoustiques, lumineux, texturés ou électromagnétiques – proviennent d'essais terrestres et restent non documentés en contexte marin. Leur efficacité varie selon les espèces, avec un risque d'habituation rapide. Certaines solutions, telles que les ultrasons ou les systèmes anti-perchoir, semblent prometteuses, mais nécessitent encore des tests en mer, tandis que d'autres, comme les lasers, revêtements ou éclairages UV, en sont au stade de prototypes expérimentaux.

Dans ce contexte, les dispositifs de dissuasion doivent être considérés comme des compléments potentiels à d'autres mesures plus éprouvées (planification spatiale, micro-siting, bridage). Leur développement futur dépendra d'un investissement en recherche appliquée, en lien étroit avec les

connaissances écologiques des espèces concernées et les contraintes d'exploitation offshore. Pour les développeurs et les décideurs, il s'agit d'un domaine à suivre activement, en soutenant des projets pilotes et des programmes de validation scientifique, afin de déterminer si certaines solutions peuvent être intégrées de manière opérationnelle dans les prochaines générations de parcs éoliens marins.

Renouvellement du parc éolien (« Repowering »)

Le renouvellement des parcs éoliens, ou repowering, désigne le processus de remplacement d'anciennes turbines par de nouvelles unités plus performantes, souvent accompagnées d'un réajustement de l'implantation ou du design global du parc. Cette approche est mentionnée dans une revue scientifique qui suggère qu'elle peut constituer une opportunité stratégique pour limiter les impacts sur la faune volante (Gulka et al., 2024).

L'un des leviers d'atténuation identifié dans la revue citée est le micro-siting : une révision ciblée de la disposition des turbines, ou le démantèlement sélectif de celles qui génèrent des impacts écologiques disproportionnés. Cela implique de s'appuyer sur des données précises, comme les taux de collision spécifiques à chaque turbine. Toutefois, la mise en œuvre de cette stratégie repose largement sur la disponibilité de données à haute résolution, souvent plus accessibles pour les parcs terrestres que pour les installations en mer. En effet, le suivi spatio-temporel des collisions ou des usages de l'espace par la faune volante est particulièrement difficile en milieu marin, en raison des contraintes techniques et logistiques.

Bien que prometteuse sur le principe, cette mesure d'atténuation n'a pas encore été appliquée ni évaluée dans un contexte marin. Elle nécessite donc un effort important en matière de surveillance écologique en mer afin de permettre une application éclairée et efficace du renouvellement comme stratégie d'atténuation.

Ce qu'il faut retenir ...

Le renouvellement des parcs éoliens représente une opportunité émergente pour intégrer plus efficacement les enjeux de biodiversité dans la gestion à long terme des infrastructures offshore. En permettant un réaménagement spatial et technologique du parc, cette phase offre la possibilité d'appliquer des mesures d'atténuation ciblées, telles que le micro-siting ou le retrait de turbines à impact élevé, sur la base d'une meilleure connaissance accumulée au fil du temps.

Cependant, pour que cette stratégie devienne un réel levier de réduction des impacts sur les oiseaux et les chauves-souris, elle suppose la mise en place de protocoles de suivi écologique robustes et continus, capables d'identifier les turbines les plus problématiques. Or, la disponibilité de données fines en mer reste aujourd'hui un défi majeur. La réussite du renouvellement comme outil d'atténuation dépendra donc d'un investissement accru dans le suivi environnemental offshore et d'un cadre de gouvernance encourageant l'exploitation active de ces données dans les phases de reconfiguration des projets.

Mesures compensatoires

Les mesures compensatoires sont destinées à contrebalancer les effets négatifs résiduels des parcs éoliens marins sur les populations d'oiseaux et de chauves-souris, une fois les mesures d'évitement et de réduction pleinement exploitées. Elles comprennent principalement : (i) la création ou la restauration d'habitats favorables, (ii) des actions de conservation ciblées sur les espèces les plus affectées et, lorsqu'elle est permise, (iii) une compensation financière. En parallèle, une planification stratégique et une évaluation rigoureuse des mesures mises en place constituent un cadre transversal

: elles s'appliquent à chacune des actions précédentes pour en assurer la cohérence, le suivi et l'efficacité sur le long terme.

Planification et évaluation des mesures compensatoires

Les références concernées insistent sur la nécessité d'une planification rigoureuse et d'une évaluation précise de l'efficacité des mesures compensatoires adoptées. Reid et al. (2023) soulignent le défi posé par l'évaluation écologique et économique précise des bénéfices réels obtenus par ces mesures, nécessaire afin d'éviter les résultats imprévus ou indésirables qui pourraient compromettre l'objectif initial de compensation. Croll et al. (2022) recommandent d'adopter une approche coordonnée à large échelle, régionale ou même internationale, compte tenu des vastes distances parcourues par les oiseaux migrateurs.

Compensation basée sur l'habitat

Cette stratégie inclue des mesures de restauration, d'amélioration ou de création d'habitats, mises en œuvre directement par les porteurs de projet ou via des programmes de compensation (« permittee-responsible compensation »). Elles permettent d'améliorer les conditions écologiques pour les populations affectées par les installations éoliennes (Gulka et al., 2024). Reid et al. (2023) citent l'exemple de la création de sanctuaires ou de réserves naturelles éloignées des zones d'implantation des éoliennes, qui peuvent constituer des refuges efficaces pour les espèces vulnérables.

Mesures de conservation espèce-ciblée

Les mesures de conservation directement ciblées sur certaines espèces affectées par les éoliennes sont mentionnées dans deux revues de littérature. Gulka et al. (2024) discutent l'élimination des prédateurs terrestres invasifs dans les colonies de reproduction des oiseaux marins. Les résultats rapportés dans la littérature montrent une certaine variabilité selon les espèces concernées, avec des effets parfois très positifs sur les populations d'oiseaux nicheurs comme le Petit Pingouin (*Alca torda*) ou le Macareux moine (*Fratercula arctica*), mais des résultats plus mitigés pour d'autres espèces comme le Guillemot (*Uria* spp.). Croll et al. (2022) rappellent quant à eux que cette stratégie est désormais bien établie à l'échelle internationale : sur près de 1 550 opérations conduites dans le monde, le taux de succès moyen atteint 88 %, avec à la clé une réduction notable de la mortalité adulte et une nette augmentation du succès reproducteur – des gains qui peuvent compenser indirectement les pertes liées aux collisions ou aux perturbations induites par les éoliennes. Les auteurs insistent par ailleurs sur le fait que les mesures compensatoires doivent être choisies spécifiquement pour chaque espèce afin d'assurer leur efficacité maximale. Ils proposent notamment l'établissement de nouvelles colonies sécurisées par des méthodes de translocation ou d'attraction sociale dans des zones exemptes de prédateurs (« biosecure areas »). Ces zones devraient idéalement être des îles naturellement sans prédateurs plutôt que des espaces clos nécessitant une maintenance continue et coûteuse. Dans la même logique d'actions ciblées, ces auteurs préconisent également la mise en œuvre de mesures compensatoires sur des enjeux majeurs tels que la réduction des captures accidentelles dans les pêcheries (« bycatch »), une menace majeure pour de nombreuses espèces d'oiseaux marins. Ces mesures, en soutenant financièrement des modifications réglementaires ou techniques pour réduire les prises accidentelles, pourraient ainsi compenser les pertes dues aux parcs éoliens. Par ailleurs, la création de zones protégées formelles autour des sites de nidification ainsi que la gestion active des menaces locales sont des stratégies recommandées pour maximiser la survie des populations affectées par les parcs éoliens.

Compensation basée sur la finance

Cette mesure s'appuie sur des mécanismes financiers permettant de compenser indirectement les impacts des parcs éoliens. Ces mécanismes incluent la création de banques de compensation écologique (« mitigation banks »), qui consistent à protéger durablement certains habitats ou espèces sous forme de crédits écologiques utilisés pour compenser les impacts dans d'autres zones géographiques (Gulka et al., 2024). Une autre approche proche de ces banques est celle des programmes de frais compensatoires (« in-lieu fee programs»), qui fonctionnent par des contributions financières directes servant à financer des actions compensatoires spécifiques pour des espèces ou habitats précis affectés ailleurs par les impacts (Gulka et al., 2024). Croll et al. (2022) précisent quant à eux que ces mécanismes financiers doivent être intégrés dans des cadres réglementaires déjà existants et appliqués à une échelle adéquate pour couvrir l'ensemble des impacts cumulatifs des projets éoliens offshore. Ces auteurs abordent aussi l'allocation de fonds pour réduire d'autres menaces affectant les populations d'oiseaux et de chauves-souris à l'échelle régionale ou globale, au-delà des seuls impacts directs liés aux parcs éoliens.

Toutefois, la réglementation française actuelle concernant la compensation écologique, inscrite dans la séquence « éviter-réduire-compenser » (ERC), ne permet pas le recours à une compensation financière. Selon le Code de l'environnement français, toute mesure compensatoire doit se matérialiser par des actions concrètes de restauration ou de renaturation écologique, lesquelles doivent être additionnelles, mesurables et pérennes (Légifrance, 2016). Ainsi, les approches financières, telles que les simples versements compensatoires, ne sont pas acceptées juridiquement (Cerema, 2021). De plus, les guides ministériels précisent explicitement l'interdiction d'utiliser une compensation purement financière pour remplir les obligations liées aux impacts écologiques résiduels des projets (Ministère de la Transition écologique, 2025).

Ce qu'il faut retenir ...

*Les **mesures compensatoires** constituent un outil de dernier recours dans la hiérarchie des stratégies d'atténuation, destiné à contrebalancer les impacts résiduels des parcs éoliens marins sur les oiseaux et les chauves-souris, lorsque les options d'évitement et de réduction ont été pleinement mobilisées. Leur mise en œuvre repose sur une diversité d'approches complémentaires : restauration d'habitats, actions de conservation ciblées et planifications stratégiques.*

Ces mesures doivent être soigneusement planifiées, adaptées aux espèces concernées et évaluées dans la durée pour garantir qu'elles compensent effectivement les pertes écologiques générées. Des initiatives comme la suppression de prédateurs invasifs, la création de colonies sécurisées, ou encore le financement de programmes alternatifs de conservation, offrent des pistes concrètes pour renforcer la résilience des populations affectées.

Cependant, leur succès s'accompagne d'une forte incertitude et repose sur des conditions strictes : un suivi rigoureux, une coordination interrégionale, et une intégration dans une stratégie environnementale globale. Il est donc essentiel que les mesures compensatoires ne soient pas perçues comme un substitut aux efforts d'évitement, mais bien comme un complément ciblé, mobilisé avec précaution, transparence et dans une logique de conservation à long terme.

CONCLUSION

Il apparaît clairement qu'aucune mesure isolée ne peut répondre à l'ensemble des problématiques liées aux impacts des sites éoliens marins sur les espèces volantes. La diversité des comportements, des habitats et des sensibilités spécifiques des espèces concernées impose l'adoption d'une combinaison de stratégies complémentaires et modulables. Comme le met en évidence ONeil (2020), dans sa thèse portant sur l'utilisation potentielle de technologies ultrasoniques pour réduire la mortalité des chauves-souris sur les sites éoliens offshore :

« De manière générale, aucune stratégie ou technologie de réduction des impacts ne peut être appliquée à tous les scénarios. Une combinaison de bridage intelligent, de reconnaissance d'image par intelligence artificielle, de détection acoustique, de dispositifs ultrasoniques installés à la fois sur les nacelles et sur les pales, ainsi qu'une collaboration avec l'industrie permettant une modulation des éoliennes dès leur construction, facilitant l'ajout ultérieur d'équipements externes de dissuasion et de surveillance, pourrait être intégrée dès la phase préalable à la construction, dans les exigences de l'évaluation d'impact environnemental (EIE). Un suivi préalable à la construction et une EIE devraient être exigés systématiquement pour chaque projet spécifique, en prenant en compte l'emplacement, les habitats présents, les corridors saisonniers et migratoires, les espèces concernées ainsi que la disponibilité des proies pour chacune de ces espèces. L'intégration, dans les évaluations des risques, d'éléments tels que l'analyse cumulative des effets (ACE), des indices de résilience et la vulnérabilité des espèces à l'échelle des écosystèmes, constitue une nouvelle approche systémique potentiellement efficace pour réduire la mortalité des chauves-souris sur les sites éoliens. »

Cette perspective illustre l'importance d'une approche intégrée à large échelle pour la faune volante dans son ensemble. En effet, les connaissances actuelles mettent en lumière la nécessité d'adopter dès la planification initiale des projets une approche ERC (Éviter-Réduire-Compenser) : éviter d'abord les zones sensibles — notamment couloirs migratoires, colonies de nidification ou sites d'alimentation — puis appliquer des mesures de réduction opérationnelles et technologiques adaptées à chaque contexte. Le recours simultané à un bridage intelligent, à des technologies avancées de détection acoustique ou visuelle, ainsi qu'à divers dispositifs de dissuasion adaptés dès la conception initiale des projets éoliens offshore, permettrait de renforcer globalement la protection des espèces volantes sensibles. Par ailleurs, l'analyse effectuée dans ce rapport met en évidence l'urgence de développer des outils et méthodologies standardisées pour l'évaluation des impacts environnementaux, intégrant systématiquement des critères précis tels que les analyses cumulatives des effets et la résilience des espèces à l'échelle des écosystèmes. Ces outils permettront non seulement de mieux cibler les interventions, mais aussi d'identifier clairement les lacunes scientifiques existantes, comme le manque critique de données empiriques et de suivis post-installation, particulièrement pour les chauves-souris et les insectes, encore largement négligés dans les études disponibles. Cette démarche systémique souligne également la nécessité d'adopter des protocoles rigoureux dès la phase d'évaluation d'impact environnemental, incluant des critères précis de suivi et d'analyse des risques à l'échelle des écosystèmes afin de concilier efficacement le développement énergétique offshore avec la préservation de la biodiversité marine volante. Enfin, la collaboration étroite entre chercheurs, développeurs et décideurs publics apparaît indispensable pour orienter de façon proactive les investissements vers des solutions innovantes, durables et scientifiquement validées, assurant ainsi un développement harmonieux et écologiquement responsable de l'éolien marin.

REGARD D'EXPERTS

Dans une dynamique de co-construction des connaissances autour des mesures d'atténuation des impacts de l'éolien en mer sur la faune volante, une réunion d'experts a été organisée pour discuter collectivement des résultats de la synthèse bibliographique présentée ci-dessus. Elle a rassemblé des représentants de la filière éolienne (développeurs, bureaux d'études), d'établissements publics comme l'ADEME, ainsi que d'organisations internationales de conservation telles que l'IUCN, afin de favoriser un retour d'expérience ancré dans la réalité opérationnelle des projets en mer. Bien que les institutions de recherche n'aient pas pu être présentes, leur contribution a été recueillie par le biais d'un questionnaire écrit, diffusé à l'ensemble des participants et partenaires identifiés. Cette enquête visait à approfondir les retours sur le rapport intermédiaire et sur les pratiques d'atténuation : leur application concrète, leur efficacité perçue, les freins rencontrés, ainsi que les besoins en matière de recherche, de coordination et de cadre réglementaire.

En croisant les apports de la réunion et les réponses au questionnaire, cette section du rapport – « Regards d'experts » – restitue la diversité des points de vue, identifie les consensus et les controverses, et nourrit les recommandations finales d'une compréhension plus fine des pratiques, contraintes et attentes exprimées sur le terrain.

Choix et efficacité des mesures d'atténuation : une diversité de pratiques et d'approches

Une palette de mesures déployées selon les contextes et une reconnaissance unanime de la planification comme levier clé

Les mesures d'atténuation mises en œuvre ou envisagées dans les projets d'éolien en mer pour réduire les impacts sur la faune volante varient sensiblement selon le type d'acteur impliqué et le contexte du projet. Les développeurs, confrontés aux réalités économiques et techniques des projets offshore, privilégient généralement les solutions qu'ils jugent à la fois efficaces et compatibles avec les impératifs de production. L'augmentation de l'airgap, c'est-à-dire l'élévation de la distance entre la base des pales et la surface de l'eau, est fréquemment citée. Cette mesure, perçue comme peu pénalisante en termes de productible mais exigeante d'un point de vue technique et structurel, vise à limiter le risque de collision avec les oiseaux volant à basse altitude.

Le bridage des éoliennes, notamment en période d'activité accrue des chauves-souris (vent faible, température douce), est également évoqué comme une mesure transposable à l'éolien en mer avec des adaptations. Cette pratique repose sur des protocoles inspirés des retours d'expérience du terrestre, bien que leur transposition au contexte marin reste encore partiellement explorée. Certains projets pilotes intègrent aussi des systèmes de détection automatique de l'avifaune (SDA) pour activer à la demande le bridage, bien que leur maturité technologique et leur efficacité réelle en mer demeurent à démontrer.

Les bureaux d'études proposent quant à eux une approche intégrée : ils associent dès la phase de conception des projets des mesures telles que l'orientation des lignes d'éoliennes selon les axes migratoires, la réduction du nombre de turbines dans les zones sensibles, ou encore la gestion raisonnée de l'éclairage nocturne, dans les limites imposées par les réglementations de sécurité maritime et aérienne.

Par-delà la diversité des opinions sur les mesures techniques, un consensus fort se dégage sur l'importance de la planification spatiale en amont des projets. Ce levier, jugé à la fois robuste, pertinent et potentiellement structurant, permettrait d'éviter les zones à forts enjeux de biodiversité, réduisant ainsi les besoins en mesures de réduction ou de compensation ultérieures. Toutefois, plusieurs répondants soulignent que cette compétence relève principalement de l'État et que la planification actuelle reste trop déconnectée des réalités écologiques. Cette déconnexion s'explique non seulement par l'insuffisance ou l'indisponibilité des données environnementales au moment des appels d'offres,

mais surtout par la prédominance des contraintes économiques et techniques, qui relèguent les enjeux écologiques au second plan.

Des critères de sélection contrastés selon les acteurs

Le choix des mesures d'atténuation repose sur des critères multiples et parfois contradictoires. Pour les développeurs, le facteur décisif reste l'équilibre entre efficacité écologique supposée et faisabilité économique. L'arbitrage entre plusieurs mesures (par exemple, airgap vs bridage) se fait souvent à l'aide d'analyses coût-bénéfice internes, intégrées à la stratégie de réponse aux appels d'offres. Toutefois, certains acteurs déplorent que depuis l'appel d'offres n°9 (AO9) – l'un des plus récents lancés par l'État français pour attribuer des zones à l'éolien en mer posé –, les critères environnementaux aient été retirés des éléments pondérés dans la sélection des lauréats. Alors que ces critères figuraient dans les appels précédents et permettaient aux candidats de valoriser des mesures ambitieuses de réduction des impacts sur la biodiversité, leur disparition est perçue comme un signal désincitatif. Cela contribue, selon certains développeurs, à recentrer les candidatures uniquement sur des critères économiques (coût du MWh), au détriment de l'innovation environnementale.

Les chercheurs (notamment du CEFE) et les institutions publiques (comme l'OFB), en revanche, privilégient des critères d'efficacité écologique démontrable, et s'inquiètent de voir certaines mesures appliquées sans validation scientifique solide.

Une efficacité difficile à documenter en contexte offshore

L'efficacité réelle des mesures d'atténuation fait l'objet de débats, notamment en raison du manque d'études consolidées en mer. Si certaines mesures comme le bridage ont fait l'objet de publications validées à terre, leur transposition au contexte marin souffre d'un manque de séries temporelles longues, de protocoles harmonisés et de données ouvertes.

À l'heure actuelle, les évaluations sont le plus souvent menées par les développeurs ou leurs prestataires, dans le cadre des suivis post-construction requis par la réglementation. Ces suivis, bien qu'encadrés administrativement, présentent une grande hétérogénéité méthodologique, ce qui limite leur comparabilité et empêche une évaluation cumulative des impacts et des réponses apportées. L'OFB, pour sa part, contrôle la conformité des mesures telles qu'elles sont prescrites par les arrêtés d'autorisation (par ex. présence effective d'un bridage, activation déclarée), sans avoir en charge l'évaluation biologique de ces mesures. Les chercheurs académiques appellent ainsi à la mise en place d'approches plus rigoureuses (type BACI – Before-After-Control-Impact), mais soulignent les difficultés techniques et logistiques liées à leur déploiement en milieu marin.

Freins et obstacles rencontrés : un diagnostic partagé

Malgré une volonté affirmée de réduire les impacts de l'éolien en mer sur la faune volante, les retours d'expérience recueillis lors de l'atelier et via le questionnaire convergent vers un constat partagé : la mise en œuvre des mesures d'atténuation se heurte à une série d'obstacles, à la fois techniques, économiques, scientifiques, réglementaires et institutionnels. Ces freins, bien que de nature différente selon les profils d'acteurs, contribuent à ralentir la diffusion et la consolidation des bonnes pratiques.

Freins techniques et économiques

Pour les développeurs, les obstacles les plus prégnants sont de nature technique et financière. Certaines mesures structurelles, comme l'augmentation de l'airgap ou l'intégration de systèmes de bridage adaptatif, engendrent des surcoûts importants et des contraintes technologiques qui peuvent affecter la rentabilité ou même la faisabilité technique des projets. L'intégration de dispositifs de détection de la faune (radars, capteurs visuels, LIDARs) est perçue comme encore trop coûteuse pour

être généralisée, en particulier dans des environnements marins complexes où les conditions de mer, la corrosion et l'autonomie énergétique posent des défis majeurs.

Ces coûts sont d'autant plus sensibles que la compétitivité économique reste le principal critère de sélection dans les appels d'offres récents, comme l'a illustré AO9. En l'absence de pondération des engagements environnementaux, les mesures volontaires au bénéfice de la biodiversité peinent à se justifier économiquement, sauf lorsqu'elles sont imposées par la réglementation.

Freins réglementaires et juridiques

Plusieurs répondants, qu'ils soient développeurs, bureaux d'études ou chercheurs, pointent les blocages liés au cadre réglementaire. Le principe de précaution, tel qu'interprété dans certains cas, est jugé restrictif : il empêche parfois la mise en œuvre de mesures expérimentales faute de preuve préalable de leur efficacité, tout en rendant cette démonstration difficile en l'absence d'expérimentation autorisée. Ce paradoxe réglementaire contribue à figer les pratiques, et décourage le développement de solutions innovantes.

Des contraintes réglementaires sectorielles (notamment celles imposées par la Direction de la sécurité de l'aviation civile – DSAC – ou les autorités maritimes) sont également identifiées comme des freins. Elles interdisent, par exemple, toute modulation dynamique de l'éclairage des éoliennes, alors même que cette mesure pourrait permettre de limiter l'attraction lumineuse des oiseaux. Par ailleurs, la modification d'un arrêté préfectoral pour introduire une nouvelle mesure ou ajuster un protocole de suivi entraîne souvent une réouverture administrative du dossier, perçue comme complexe, coûteuse et incertaine.

Freins scientifiques et méthodologiques

Les obstacles d'ordre scientifique sont également centraux. Le manque de protocoles harmonisés, de standards méthodologiques partagés, et de données exploitables à grande échelle empêche une évaluation rigoureuse et cumulative de l'efficacité des mesures. Chaque projet développe ses propres indicateurs et formats, souvent non interopérables, ce qui limite fortement la capacité à tirer des enseignements consolidés à l'échelle nationale ou européenne.

Les chercheurs soulignent aussi la lourdeur logistique et la complexité des protocoles robustes de type BACI (Before-After-Control-Impact), difficilement applicables en contexte marin sans ressources importantes et sans accès fluide aux sites et aux données. La faible attractivité académique de ce type de recherche appliquée, combinée à l'absence de financements pérennes dédiés, constitue un frein supplémentaire à l'essor de projets collaboratifs ambitieux.

Freins culturels et institutionnels

Enfin, plusieurs obstacles relèvent de facteurs institutionnels ou culturels. Le climat de défiance parfois perceptible entre la communauté scientifique et la filière a été exprimé tant dans les réponses au questionnaire que lors de l'atelier d'experts. Plusieurs chercheurs ont fait part de leur réticence croissante à s'impliquer dans des projets menés par des acteurs privés. Cette défiance s'accompagne d'un manque de reconnaissance institutionnelle du travail de recherche appliquée mené en partenariat avec l'industrie, ce qui rend ces collaborations peu attractives dans un parcours académique classique. À l'inverse, certains représentants de la filière éolienne offshore témoignent de leurs propres difficultés à établir des liens de travail avec des équipes scientifiques. Ils soulignent la disponibilité limitée des chercheurs, une forme de prudence excessive vis-à-vis des projets industriels, et parfois une méconnaissance des contraintes propres au développement de projets complexes en mer. Cette perception peut entretenir chez les développeurs un sentiment de solitude face à la recherche, ou d'incompréhension des logiques de temporalité et de gouvernance du monde académique.

Ces critiques croisées révèlent une fracture de confiance qui nuit à la mise en œuvre de projets conjoints ambitieux. En l'absence d'un cadre de collaboration sécurisé, pérenne et valorisé des deux côtés, le potentiel de co-construction entre science et industrie reste largement sous-exploité. Cette difficulté au dialogue est d'autant plus problématique que les enjeux posés par l'éolien offshore sur la biodiversité nécessitent des compétences transversales, un accès facilité aux données, et une mutualisation des expertises sur le long terme.

En parallèle, les institutions publiques et les services instructeurs (DREAL, OFB, etc.) apparaissent comme sous-dotés en moyens humains et techniques pour analyser les données environnementales générées par les projets et jouer pleinement leur rôle de tiers garant. Cette situation contribue à un déséquilibre entre les obligations formelles imposées aux porteurs de projet et la capacité effective de l'administration à en assurer le suivi ou à nourrir une réflexion stratégique sur l'évolution des pratiques.

Au-delà des freins techniques ou réglementaires, les obstacles culturels et institutionnels dessinent un terrain de jeu fragmenté, dans lequel la coopération intersectorielle peine à s'institutionnaliser. Les appels à une gouvernance partagée, à des dispositifs de coordination neutres et à des cadres de collaboration clarifiés apparaissent ici comme des leviers indispensables pour surmonter ces blocages structurels.

Ainsi, les freins à la mise en œuvre des mesures d'atténuation sont multiples, systémiques et souvent interconnectés. Ils appellent à une réponse coordonnée, associant simplification réglementaire, structuration de la recherche appliquée, incitation économique à l'innovation environnementale, et renforcement des moyens publics de suivi et d'analyse.

Structurer la recherche et valoriser les connaissances existantes

L'ensemble des retours d'experts convergent sur un constat : la recherche appliquée aux impacts de l'éolien en mer sur la faune volante, et plus spécifiquement à l'efficacité des mesures d'atténuation, accuse un retard structurel. Ce décalage est attribué à un manque de coordination nationale, à la rareté des financements pérennes dédiés à ces questions, mais aussi à une faible reconnaissance de la recherche partenariale dans les parcours académiques classiques. À cela s'ajoute un constat récurrent sur la sous-exploitation des données environnementales existantes, pourtant nombreuses, mais trop souvent cloisonnées ou inaccessibles.

Une recherche encore morcelée, faiblement structurée à l'échelle nationale

Le déficit de structuration de la recherche sur les mesures d'atténuation est mis en évidence par plusieurs répondants, tant du monde académique que de la filière industrielle. Du point de vue des chercheurs, les projets d'évaluation de l'efficacité des mesures nécessitent des approches expérimentales robustes (idéalement de type BACI), qui sont difficiles à mettre en œuvre en mer, coûteuses, et peu soutenues par des dispositifs de financement à long terme. En l'absence d'un cadre institutionnalisé encadrant ces coopérations, ces partenariats sont parfois perçus comme peu sécurisés, exposant les chercheurs à des tensions ou à un déficit de reconnaissance, et les rendant ainsi peu attractifs dans un parcours académique traditionnel. Il en résulte une mobilisation limitée des équipes académiques, ce qui ralentit la montée en expertise sur ces thématiques pourtant stratégiques.

Du côté des développeurs, ce morcellement se traduit par un manque de lisibilité sur les référentiels scientifiques existants et par une difficulté à identifier des partenaires de recherche sur le long terme. Plusieurs acteurs expriment aussi leur frustration face à l'absence de structure nationale capable de piloter, capitaliser et diffuser les résultats de manière cohérente. Le démantèlement annoncé de l'observatoire national de l'éolien en mer, au profit de dispositifs fragmentés par façade géographique, est perçu comme un signal défavorable à l'ambition d'une stratégie de recherche unifiée à l'échelle nationale.

Des propositions concrètes émergent néanmoins de ces constats, telles que la création d'un consortium scientifique interinstitutionnel, ou l'appui à des structures existantes telles que le CESAB de la FRB, pour jouer un rôle de centre de synthèse et d'animation. L'objectif serait d'articuler les contributions de la recherche, de l'expertise publique et des opérateurs dans des projets communs, avec des outils de gouvernance partagée.

Des données sous-exploitées et difficilement accessibles

Outre le besoin de production de nouvelles connaissances, les répondants s'accordent sur un autre levier essentiel : la valorisation des données environnementales déjà collectées dans les projets éoliens. Depuis plusieurs années, les développeurs sont tenus de verser des jeux de données sur des plateformes réglementaires telles que DEPOBIO, mais ces informations restent difficiles à exploiter. Plusieurs freins sont identifiés : hétérogénéité des formats, absence de standards méthodologiques, manque de métadonnées, complexité d'accès aux portails, et insuffisance de ressources humaines pour en assurer le traitement.

Ce constat conduit à des propositions récurrentes : la mise en place d'un portail unique, ergonomique et interopérable, piloté par un organisme tiers, qui permettrait de centraliser, structurer et analyser les données dans une logique d'open science progressive. Plusieurs interlocuteurs rappellent toutefois que la plateforme Depobio assure déjà, en théorie, cette fonction ; le principal frein tient aujourd'hui au remplissage – encore très progressif et hétérogène – des jeux de données par les pétitionnaires.

En outre, certains experts se montrent réservés : même si un tel portail améliorerait la transparence et faciliterait les analyses cumulatives, le potentiel de ces données pour la recherche reste limité, leur résolution étant souvent insuffisante pour évaluer, par exemple, l'efficacité fine des dispositifs de réduction des impacts.

Un modèle de gouvernance inspiré de l'exemple belge (où l'Institut royal des sciences naturelles centralise les données et publie des rapports d'analyse annuels) est cité comme source d'inspiration. L'objectif ne serait donc pas seulement de dépasser la logique actuelle du « dépôt pour conformité », mais aussi d'harmoniser les protocoles, de garantir la qualité des métadonnées et d'imposer des contrôles qualité, conditions préalables à toute véritable capitalisation des expériences et à un partage fiable des enseignements à l'échelle de la filière.

Enfin, plusieurs intervenants insistent sur la nécessité de soutenir la production de publications scientifiques, issues de ces jeux de données. Ils soulignent cependant qu'on ne peut pas publier de simples suivis : il faut les inscrire dans des protocoles conçus pour répondre à des questions de recherche explicites. Lorsque ces conditions méthodologiques sont réunies, la valorisation des suivis environnementaux dans des revues à comité de lecture peut renforcer la visibilité internationale des efforts français en matière de biodiversité et d'éolien offshore, tout en facilitant l'accès aux résultats pour la communauté scientifique.

Renforcer le rôle de l'État comme garant d'une intégration cohérente de la biodiversité

Plusieurs pistes d'action portent enfin sur le rôle que pourrait jouer l'État dans la mise en œuvre de ces évolutions. Il s'agit d'abord de renforcer la cohérence entre les différentes politiques publiques (énergie, biodiversité, pêche, urbanisme maritime), qui sont encore trop souvent conçues et mises en œuvre de manière cloisonnée. L'État est également appelé à jouer un rôle plus actif en tant que facilitateur de l'innovation écologique, en autorisant et en accompagnant des démarches expérimentales de terrain, et en donnant une visibilité politique claire à l'objectif d'une filière éolienne compatible avec la biodiversité.

En parallèle, les experts insistent sur la nécessité de renforcer les capacités techniques et humaines des services de l'État, afin qu'ils puissent assurer un suivi effectif des obligations environnementales,

interpréter les résultats des suivis, et contribuer activement à l'évolution des standards et des pratiques.

Conclusion : vers une approche collective et intégrée biodiversité-énergie

Les contributions recueillies au travers de l'atelier d'experts et du questionnaire révèlent une mobilisation croissante autour des enjeux d'atténuation des impacts de l'éolien en mer sur la faune volante. Si les pratiques diffèrent encore selon les profils institutionnels, les contextes techniques et les cadres réglementaires, plusieurs lignes de force se dégagent avec clarté. D'abord, la reconnaissance partagée de l'importance d'agir à la fois sur la planification en amont et sur l'efficacité quantifiée des mesures appliquées sur les parcs. Ensuite, un constat commun sur la nécessité de structurer la gouvernance scientifique des données, d'harmoniser les méthodologies et d'ouvrir les dispositifs à l'expérimentation écologique encadrée.

La transition énergétique ne peut réussir durablement sans intégrer pleinement les exigences de préservation de la biodiversité. Ces échanges montrent que les outils existent, les savoirs s'accumulent, mais que leur mobilisation reste entravée par des freins institutionnels, culturels et organisationnels. Pour les surmonter, il est indispensable de sortir d'une logique de conformité individuelle pour aller vers une dynamique collective, fondée sur le partage de la connaissance, l'ouverture des données, et la coopération entre recherche, industrie et pouvoirs publics.

Plus qu'un état des lieux, cette synthèse des « regards d'experts » appelle à une évolution du modèle de gouvernance environnementale du secteur : un modèle capable de faire coexister les ambitions énergétiques et les impératifs écologiques, dans une logique de progrès continu, de transparence et de confiance mutuelle.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES GENERALES

- Adams, T. P., Miller, R. G., Aleynik, D., & Burrows, M. T. (2014). Offshore marine renewable energy devices as stepping stones across biogeographical boundaries. *Journal of Applied Ecology*, 51(2), 330–338.
- Arnett, E. B., & May, R. F. (2016). Mitigating wind energy impacts on wildlife: Approaches for multiple taxa. *Human–Wildlife Interactions*, 10(1), Article 5.
- Azam, C., Kerbiriou, C., Vernet, A., Julien, J.-F., Bas, Y., Plichard, L., Maratrat, J., & Le Viol, I. (2015). Is part-night lighting an effective measure to limit the impacts of artificial lighting on bats? *Global Change Biology*, 21(12), 4333–4341. <https://doi.org/10.1111/gcb.13036>
- Bowgen, K., & Cook, A. S. C. P. (2018). *Bird collision avoidance: Empirical evidence and impact assessments* (JNCC Report No. 614). Joint Nature Conservation Committee.
- Bureau of Ocean Energy Management (BOEM). (2023). *Background & Potential Impacts of Offshore Wind Farms on Marine Ecosystems*. BOEM.
- Bureau of Ocean Energy Management. (2024). *Guidance on compensatory mitigation to achieve net positive impacts of offshore wind energy to seabirds* (PC 25-01). U.S. Department of the Interior.
- Cerema. (2021). Approche standardisée du dimensionnement de la compensation écologique : Guide de mise en œuvre (v2). https://www.cerema.fr/system/files/documents/2021/06/approche_standardisee_guide_v2.pdf
- Cravens, Z. M., & Boyles, J. G. (2019). Illuminating the physiological implications of artificial light on an insectivorous bat community. *Oecologia*, 189(1), 69–77. <https://doi.org/10.1007/s00442-018-4300-6>
- Croll, D. A., Ellis, A. A., Adams, J., ... & Kelsey, E. (2022). Framework for assessing and mitigating the impacts of offshore wind energy development on marine birds. *Biological Conservation*, 276, 109795.
- Department for Environment, Food & Rural Affairs. (2025, 28 mars). *Offshore wind development: Library of strategic compensatory measures* [Guidance]. GOV.UK.
- Degraer, S., Carey, D. A., Coolen, J. W. P., Hutchison, Z. L., Kerckhof, F., Rumes, B., & Vanaverbeke, J. (2020). Offshore wind farm artificial reefs affect ecosystem structure and functioning: A synthesis. *Oceanography*, 33(4), 48–57.
- Dias, M. P., Martin, R., Pearmain, E. J., Burfield, I. J., Small, C., Phillips, R. A., ... & Croxall, J. P. (2019). Threats to seabirds: A global assessment. *Biological Conservation*, 237, 525–537.
- Dierschke, V., & Garthe, S. (2016). Seabird avoidance and attraction responses to offshore wind farms: A review. *Marine Ecology Progress Series*, 554, 1–14.
- Dierschke, V., Furness, R. W., & Garthe, S. (2016). Seabirds and offshore wind farms in European waters: Avoidance and attraction. *Biological Conservation*, 202, 59–68.
- Direction générale de l'énergie et du climat. (2025, mars). Tableau de bord : éolien — Premier trimestre 2025 [Statistiques]. Ministère de la Transition écologique. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/tableau-de-bord-eolien-premier-trimestre-2025-1>
- Douvere, F. (2008). The importance of marine spatial planning in advancing ecosystem-based sea use management. *Marine policy*, 32(5), 762–771.
- Frick, W. F., Kingston, T., & Flanders, J. (2020). A review of the major threats and challenges to global bat conservation. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1469(1), 5–25.
- Galparsoro, I., Menchaca, I., Garmendia, J. M., Borja, Á., Maldonado, A. D., Iglesias, G., & Bald, J. (2022). Reviewing the ecological impacts of offshore wind farms. *npj Ocean Sustainability*, 1(1), 1–16.
- Gauthreaux, S. A., Jr., & Belser, C. G. (2006). Effects of artificial night lighting on migrating birds. In C. Rich & T. Longcore (Eds.), *Ecological consequences of artificial night lighting* (pp. 67–93). Island Press.
- Gill, A. B., Degraer, S., Lipsky, A., Mavraki, N., Methratta, E., & Brabant, R. (2020). Setting the context for offshore wind development effects on fish and fisheries. *Oceanography*, 33(4), 118–127.
- Hammar, L., Perry, D., & Gullström, M. (2015). Offshore wind power for marine conservation. *Open Journal of Marine Science*, 6(1), 66–78.

- Hüppop, O., Hüppop, K., Dierschke, J., & Hill, R. (2016).** Bird collisions at an offshore platform in the North Sea. *Bird Study*, 63(1), 73–82. <https://doi.org/10.1080/00063657.2015.1134440>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).** (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report*. IPCC.
- Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES).** (2019). *Global assessment report on biodiversity and ecosystem services: Summary for policymakers*. IPBES Secretariat.
- International Energy Agency.** (2025a). Electricity 2025: Emissions <https://www.iea.org/reports/electricity-2025/emissions>
- International Energy Agency.** (2025b). Global Energy Review 2025 – CO₂ emissions <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025/co2-emissions>
- Lamb, J., Gulka, J., Adams, E., Cook, A., & Williams, K. A. (2024).** A synthetic analysis of post-construction displacement and attraction of marine birds at offshore wind energy installations. *Environmental Impact Assessment Review*, 108, 107611.
- Légifrance.** (2016, août 9). Code de l'environnement – Article L163-1 à L163-5. *Légifrance*. https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/article_jo/JORFARTI000033016416
- Légifrance.** (2015, 19 août). Code de l'énergie – Article L311-5 : Autorisation d'exploiter une installation de production d'électricité. https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000031069738
- Légifrance.** (2016, 8 décembre). Ordonnance n° 2016-1687 relative aux espaces maritimes relevant de la souveraineté ou de la juridiction de la République française (version consolidée). <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000033553233>
- Légifrance.** (2022, 20 juillet). Décret n° 2022-1025 modifiant diverses dispositions relatives à l'évaluation environnementale (entrée en vigueur le 1^{er} septembre 2022). https://www.legifrance.gouv.fr/codes/section_lc/LEGITEXT000006074220/LEGISCTA000006159331
- Légifrance.** (2024a). Code de l'environnement – Articles L122-1 et R122-2 : Étude d'impact environnemental des projets. https://www.legifrance.gouv.fr/loda/article_lc/LEGIARTI000041454254
- Légifrance.** (2024b). Code de l'environnement – Articles L122-4 et R122-17 : Évaluation environnementale stratégique des plans et programmes. <https://www.legifrance.gouv.fr/codes/id/LEGISCTA000043743370>
- May, R., Nygård, T., Falkdalen, U., Åström, J., Hamre, Ø., & Stokke, B. G. (2020).** Paint it black: Efficacy of increased wind turbine rotor blade visibility to reduce avian fatalities. *Ecology and evolution*, 10(16), 8927-8935.
- Ministère de la Transition Écologique.** (s. d.). *Cadre réglementaire des éoliennes en mer*. Eoliennesenmer.fr. Consulté le 6 mai 2025, de <https://www.eoliennesenmer.fr/generalites-eoliennes-en-mer/cadre-reglementaire>
- Ministère de la Transition Écologique.** (2024, 20 mars). *La France réduit encore ses émissions de CO₂ en 2023* [Communiqué de presse]. Gouvernement français. <https://www.ecologie.gouv.fr/actualites/france-reduit-encore-ses-emissions-co2-2023>
- Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires.** (2025). Sites naturels de compensation, restauration et renaturation. Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires. <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/sites-naturels-compensation-restauration-renaturation>
- Montevecchi, W. A. (2006).** Influences of artificial light on marine birds. In C. Rich & T. Longcore (Eds.), *Ecological consequences of artificial night lighting* (pp. 94–113). Island Press.
- Mooney, T. A., Andersson, M. H., & Stanley, J. (2020).** Acoustic impacts of offshore wind energy on fishery resources. *Oceanography*, 33(4), 82-95.
- Natural England.** (2022). *Offshore renewable-energy strategic research plan: Compensation measures for seabirds* (NECR 456). Natural England.
- Neate-Clegg, M. H., Horns, J. J., Adler, F. R., Aytekin, M. Ç. K., & Şekercioğlu, Ç. H. (2020).** Monitoring the world's bird populations with community science data. *Biological Conservation*, 248, 108653.
- Nielsen, P., Zang, C., & Qi, W. (2024).** Scour protection measures for offshore wind turbines: A systematic literature review on recent developments. *Energies*, 17(5), 1068.

- Perrow, M. R.** (Ed.). (2017). *Wildlife and wind farms – Conflicts and solutions: Onshore: Potential effects* (Vol. 1). Pelagic Publishing.
- Perrow, M. R.** (Ed.). (2019). *Wildlife and wind farms – Conflicts and solutions: Offshore: Potential effects* (Vol. 3). Pelagic Publishing.
- Préfecture du Nord.** (2024, 8 avril). *Enquête publique unique sur le projet de parc éolien en mer de Dunkerque et son raccordement électrique* [Avis d'enquête publique]. <https://www.nord.gouv.fr/Actions-de-l-Etat/Environnement/Air-climat-energie/Les-energies-renouvelables/L-energie-eolienne/Eolien-en-mer/Enquete-publique-unique-sur-le-projet-de-parc-eolien-en-mer-et-son-raccordement-electrique>
- Rebke, M., Dierschke, V., Weiner, C. N., Aumüller, R., Hill, K., & Hill, R.** (2019). Attraction of nocturnally migrating birds to artificial light: The influence of colour, intensity and blinking mode under different cloud cover conditions. *Biological Conservation*, 233, 220–227.
- REN21.** (2021). *Renewables 2021 Global Status Report*. REN21 Secretariat.
- Renewable Energy Wildlife Institute.** (2022, 27 décembre). *Mitigation hierarchy: Avoid, minimize, compensate* (Guide to Wind Energy & Wildlife, chap. 1). <https://rewi.org/guide/chapters/01-regulatory-context-study-methods-and-development-guidelines/mitigation-hierarchy-avoid-minimize-compensate/>
- Réseau de Transport d'Électricité (RTE).** (2024, 7 février). *Bilan électrique 2023 – Communiqué de presse et synthèse des résultats*. RTE France. https://assets.rte-france.com/prod/public/2024-02/CP-Bilan-Electrique-2023_0.pdf
- Reubens, J., Vandendriessche, S., Degraer, S., & Willems, W.** (2013). Offshore wind farms as productive sites for fishes ? In S. Degraer, R. Brabant, & B. Rumes (Eds.), *Environmental impacts of offshore wind farms in the Belgian part of the North Sea* (pp. 153–161). Royal Belgian Institute of Natural Sciences.
- Rydell, J.** (1992). Exploitation of insects around streetlamps by bats in Sweden. *Functional Ecology*, 6(6), 744–750. <https://doi.org/10.2307/2389972>
- Skov, H., Heinänen, S., Norman, T., Ward, R. M., Méndez Roldán, S., & Ellis, I.** (2018). *ORJIP bird collision and avoidance study: Final report – April 2018*. Carbon Trust.
- United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC).** (2015). *Paris Agreement*. United Nations.
- van der Molen, J., Smith, H. C., Lepper, P., Limpenny, S., & Rees, J.** (2014). Predicting the large-scale consequences of offshore wind turbine array development on a North Sea ecosystem. *Continental shelf research*, 85, 60-72.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES SELECTIONNEES POUR LA REVUE

★ *Références additionnelles non issues de la recherche bibliographique systématique, communiquées par un tiers extérieur et intégrées a posteriori pour leur valeur illustrative*

- Abramic, A., Cordero-Penin, V., & Haroun, R.** (2022). Environmental impact assessment framework for offshore wind energy developments based on the marine Good Environmental Status. *Environmental impact assessment review*, 97, 106862.
- Bach, P., Voigt, C. C., Goettsche, M., Bach, L., Brust, V., Hill, R., Hueppop, O., Lagerveld, S., Schmaljohann, H., & Seebens-Hoyer, A.** (2022). Offshore and coastline migration of radio-tagged Nathusius' pipistrelles. *Conservation Science and Practice*, 4(10), e12783.
- Best, B. D., & Halpin, P. N.** (2019). Minimizing wildlife impacts for offshore wind energy development : Winning tradeoffs for seabirds in space and cetaceans in time. *PLoS One*, 14(5), e0215722.
- Brabant, S., R., Rumes, B., Degraer.** (2021). Occurrence of intense bird migration events at rotor height in Belgian offshore wind farms and curtailment as possible mitigation to reduce collision risk. *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*, 47-55.
- Brabant, R., Laurent, Y., Jonge Poerink, B., & Degraer, S.** (2021). The relation between migratory activity of Pipistrellus bats at sea and weather conditions offers possibilities to reduce offshore wind farm effects. *Animals*, 11(12), 3457.
- Bradarić, J. S., Maja; Kranstauber, Bart; Bouten, Willem; van Gasteren, Hans; Baranes.** (2024). Drivers of flight altitude during nocturnal bird migration over the North Sea and implications for offshore wind energy. *Conservation Science and Practice*, 6(4), e13114.
- Busch, M., Kannen, A., Garthe, S., & Jessopp, M.** (2013). Consequences of a cumulative perspective on marine environmental impacts: offshore wind farming and seabirds at North Sea scale in context of the EU Marine Strategy Framework Directive. *Ocean & Coastal Management*, 71, 213-224.
- Christel, I., Certain, G., Cama, A., Vieites, D. R., & Ferrer, X.** (2013). Seabird aggregative patterns: A new tool for offshore wind energy risk assessment. *Marine pollution bulletin*, 66(1-2), 84-91.
- Cleasby, I. R., Wakefield, E. D., Bearhop, S., Bodey, T. W., Votier, S. C., & Hamer, K. C.** (2015). Three-dimensional tracking of a wide-ranging marine predator: flight heights and vulnerability to offshore wind farms. *Journal of applied ecology*, 52(6), 1474-1482.
- Croll, D. A., Ellis, A. A., Adams, J., Cook, A. S. C. P., Garthe, S., Goodale, M. W., Hall, C. S., Hazen, E., Keitt, B. S., Kelsey, E. C., Leirness, J. B., Lyons, D. E., McKown, M. W., Potiek, A., Searle, K. R., Soudijn, F. H., Rockwood, R. C., Tershy, B. R., Tinker, M., ... Zilliacus, K.** (2022). Framework for assessing and mitigating the impacts of offshore wind energy development on marine birds. *Biological Conservation*, 276, 109795.
- Desholm, M.** (2009). Avian sensitivity to mortality: Prioritising migratory bird species for assessment at proposed wind farms. *Journal of Environmental Management*, 90(8), 2672-2679.
- Fox, A. D., Desholm, M., Kahlert, J., Kjaer Christensen, T., & Petersen, I. K.** (2006). Information needs to support environmental impact assessment of the effects of European marine offshore wind farms on birds. *Ibis*, 148, 129-144.
- Garthe, S., & Hüppop, O.** (2004). Scaling possible adverse effects of marine wind farms on seabirds: developing and applying a vulnerability index. *Journal of applied Ecology*, 41(4), 724-734.
- Goodale, M. W., & Milman, A.** (2020). Assessing cumulative exposure of northern gannets to offshore wind farms. *Wildlife Society Bulletin*, 44(2), 252-259.
- Gorman, C. E., Torsney, A., Gaughran, A., McKeon, C. M., Farrell, C. A., White, C., Donohue, I., Stout, J. C., & Buckley, Y. M.** (2023). Reconciling climate action with the need for biodiversity protection, restoration and rehabilitation. *Science of the total environment*, 857, 159316.
- Goyert, H. F., Gardner, B., Sollmann, R., Veit, R. R., Gilbert, A. T., Connelly, E. E., & Williams, K. A.** (2016). Predicting the offshore distribution and abundance of marine birds with a hierarchical community distance sampling model. *Ecological Applications*, 26(6), 1797-1815.

- Green, R. E., Gill, E., Hein, C., Couturier, L., Mascarenhas, M., May, R., Newell, D., & Rumes, B.** (2022). International assessment of priority environmental issues for land-based and offshore wind energy development. *Global sustainability*, 5, e17.
- Grover, W.** (2023). Offshore Wind Energy and Seabird Collision Vulnerability in California. <https://repository.usfca.edu/capstone/1508>
- Gulka, J., Knapp, S., Soccorsi, A., Avery-Gomm, S., Knaga, P., & Williams, K. A.** (2024). Strategies for Mitigating Impacts to Aero fauna from Offshore Wind Energy Development: Available Evidence and Data Gaps. *bioRxiv*, 2024-08.
- Hueppop, O., Dierschke, J., Exo, K.-M., Fredrich, E., & Hill, R.** (2006). Bird migration studies and potential collision risk with offshore wind turbines. *Ibis*, 148, 90-109.
- Hueppop, O., & Hilgerloh, G.** (2012). Flight call rates of migrating thrushes: effects of wind conditions, humidity and time of day at an illuminated offshore platform. *Journal of Avian Biology*, 43(1), 85-90.
- *Kentish Flats Ltd.** (2007). *Kentish Flats offshore wind farm: Ornithological monitoring report – Year 4 (December 2004 – November 2005)*. The Crown Estate.
- Lapena, B. P., Wijnberg, K. M., Hulscher, S. J. M. H., & Stein, A.** (2010). Environmental impact assessment of offshore wind farms: a simulation-based approach. *Journal of Applied Ecology*, 47(5), 1110-1118.
- Lemos, C. A., Hernandez, M., Vilardo, C., Phillips, R. A., Bugoni, L., & Sousa-Pinto, I.** (2023). Environmental assessment of proposed areas for offshore wind farms off southern Brazil based on ecological niche modeling and a species richness index for albatrosses and petrels. *Global Ecology and Conservation*, 41, e02360.
- Lieske, D. J., Tranquilla, L. M., Ronconi, R., & Abbott, S.** (2019). Synthesizing expert opinion to assess the at-sea risks to seabirds in the western North Atlantic. *Biological Conservation*, 233, 41-50.
- Loring, P. H., Paton, P. W. C., Osenkowski, J. E., Gilliland, S. G., Savard, J.-P. L., & McWilliams, S. R.** (2014). Habitat use and selection of black scoters in southern New England and siting of offshore wind energy facilities. *The Journal of Wildlife Management*, 78(4), 645-656.
- Machado, M., Rui, Nabo, Patricia; Cardia, Pedro; Moreira, Pedro; Nicolau, Pedro; Repas-Goncalves.** (2024). Bird Curtailment in Offshore Wind Farms: Application of curtailment in offshore wind farms at a sea basin level to mitigate collision risk for birds. *Birdlife Europe and Central Asia and STRIX*, Brussels, Belgium.
- Martin, G. R., & Banks, A. N.** (2023). Marine birds: Vision-based wind turbine collision mitigation. *Global Ecology and Conservation*, 42, e02386.
- Masden, E. A., Reeve, R., Desholm, M., Fox, A. D., Furness, R. W., & Haydon, D. T.** (2012). Assessing the impact of marine wind farms on birds through movement modelling. *Journal of the Royal Society Interface*, 9(74), 2120-2130.
- Nebel, C., Stjernberg, T., Tikkanen, H., & Laaksonen, T.** (2024). Reduced survival in a soaring bird breeding in wind turbine proximity along the northern Baltic Sea coast. *Biological Conservation*, 294, 110604.
- Obane, H., Kazama, K., Hashimoto, H., Nagai, Y., & Asano, K.** (2024). Assessing areas suitable for offshore wind energy considering potential risk to breeding seabirds in northern Japan. *Marine Policy*, 160, 105982.
- *Office français de la biodiversité [OFB], & Biotope.** (2025). *RETEX parcs éoliens en mer Europe – Phase 3 : analyse des retours d'expérience*. Observatoire de l'éolien en mer.
- ONeil, D. R.** (2020). Reducing bat fatalities using ultrasonic acoustic deterrent technology: a potential mechanism for conservation at offshore wind energy sites. Harvard University.
- Perrow, M. R., Gilroy, J. J., Skeate, E. R., & Tomlinson, M. L.** (2011). 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*, 62(8), 1661-1670.
- Rebke, M., Dierschke, V., Weiner, C. N., Aumüller, R., Huill, K., & Hill, R.** (2019). Attraction of nocturnally migrating birds to artificial light: The influence of colour, intensity and blinking mode under different cloud cover conditions. *Biological Conservation*, 233, 220-227.
- Reid, K., Baker, G. B., & Woehler, E. J.** (2023). An ecological risk assessment for the impacts of offshore wind farms on birds in Australia. *Austral Ecology*, 48(2), 418-439.

- Schwemmer, P., Mercker, M., Haecker, K., Kruckenberg, H., Kampfer, S., Bocher, P., Franks, S., Elts, J., Marja, R., Piha, M., Rousseau, P., Pederson, R., Duettmann, H., Fartmann, T., Garthe, S., Fort, J., & Jiguet, F.** (2023). Behavioral responses to offshore windfarms during migration of a declining shorebird species revealed by GPS-telemetry. *Journal of Environmental Management*, 342, 118131.
- Solick, D. I., & Newman, C. M.** (2021). Oceanic records of North American bats and implications for offshore wind energy development in the United States. *Ecology and Evolution*, 11(21), 14433-14447.
- Thaxter, C. B., Ross-Smith, V. H., Bouten, W., Clark, N. A., Conway, G. J., Masden, E. A., Clewley, G. D., Barber, L. J., & Burton, N. H. K.** (2019). 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*, 56(11), 2410-2422.
- Thaxter, C. B., Ross-Smith, V. H., Bouten, W., Clark, N. A., Conway, G. J., Rehfish, M. M., & Burton, N. H. K.** (2015). Seabird–wind farm interactions during the breeding season vary within and between years: a case study of lesser black-backed gull *Larus fuscus* in the UK. *Biological Conservation*, 186, 347-358.
- True, M. C., Reynolds, R. J., & Ford, W. M.** (2021). Monitoring and modeling tree bat (Genera: *Lasiurus*, *Lasionycteris*) occurrence using acoustics on structures off the mid-Atlantic coast—Implications for offshore wind development. *Animals*, 11(11), 3146.
- True, M. C., Gorman, K. M., Taylor, H., Reynolds, R. J., & Ford, W. M.** (2023). Fall migration, oceanic movement, and site residency patterns of eastern red bats (*Lasiurus borealis*) on the mid-Atlantic Coast. *Movement Ecology*, 11(1), 35.
- Walsh, B., Cormac; Hüppop, Ommo; Karwinkel, Thiemo; Liedvogel, Miriam; Lindecke, Oliver; McLaren, James; Schmaljohann, Heiko; Siebenhüner.** (2024). Light Pollution at Sea: Implications and Potential Hazards of Human Activity for Offshore Bird and Bat Movements in the Greater North Sea.
- Watts, B. D., Hines, C., Duval, L., & Wilke, A. L.** (2022). Exposure of Whimbrels to offshore wind leases during departure from and arrival to a major mid-Atlantic staging site. *Avian Conservation and Ecology*, 17(2).
- Weiser, E. L., Overton, C. T., Douglas, D. C., Casazza, M. L., & Flint, P. L.** (2024). Geese migrating over the Pacific Ocean select altitudes coinciding with offshore wind turbine blades. *Journal of Applied Ecology*, 61(5), 951-962.
- Willmott, J. R., Forcey, G. M., & Hooton, L. A.** (2015). Developing an automated risk management tool to minimize bird and bat mortality at wind facilities. *Ambio*, 44(Suppl 4), 557-571.
- Winiarski, K. J., Miller, D. L., Paton, P. W. C., & McWilliams, S. R.** (2014). A spatial conservation prioritization approach for protecting marine birds given proposed offshore wind energy development. *Biological Conservation*, 169, 79-88.

ANNEXE I: METHODES

Recherche d'articles

Mots-clés et Équations de recherche

Conformément à nos objectifs, nous avons combiné tous les termes relatifs à la faune volante, aux solutions d'atténuation, et aux résultats. L'équation de recherche finale a été construite dans la base de données bibliographique "Web of Science core collection" (WOSCC), comme suit :

TS=((insect\$ OR invertebrate\$ OR butterfly OR lepidoptera OR avifauna OR aves OR avian OR bird\$ OR bat\$ OR chiroptera OR passerine\$ OR raptor\$ OR passeriforme\$ OR seabird* OR shorebird* OR waterbird* OR "migratory bird*" OR gull* OR tern* OR petrel* OR shearwater* OR puffin*) AND ("wind energ*" OR "wind farm\$" OR "wind power" OR "wind turbine\$" OR "wind technolog*" OR "wind park\$" OR "wind power station\$" OR "wind power plant\$" OR "wind facilit*" OR "wind installation\$") AND (evaluat* OR solution\$ OR mitigat* OR assessment* OR option\$ OR measur* OR priorit* OR reduc* OR avoid* OR compensat* OR minimize OR adapt* OR interven* OR action\$ OR manag* OR protect* OR manipul* OR counteract* OR removal OR engineer* OR plan* OR strateg* OR offset* OR curtail* OR "flight divert*" OR "attract* remov*" OR "nest* management" OR "micro-siting" OR deterr* OR "habitat restoration*" OR "habitat enhancement*" OR "habitat creation*" OR "ecological engineering" et "conservation strateg*" OR "site selection*" OR "displacement*" OR "buffer zone*») AND (impact* OR effect* OR collision\$ OR behavior OR aversion OR repulsion OR disturb* OR mortalit* OR fatalit* OR carcass* OR "population size" OR "population density" OR abundance OR occurrence OR habitat loss* OR fragmentation* OR degradation* OR response OR disruption* OR success* OR breeding OR nesting OR reproduct* OR fidelit* OR site OR richness* OR composition* OR lifespan OR surviv* OR rate) AND (offshore OR sea OR marine OR ocean OR coastal OR "continental shelf" OR tidal OR pelagic OR intertidal OR estuar*))

Toutes les équations de recherches utilisées pour chacune des requêtes effectués (y compris via les moteurs de recherche, les bases de données de publications, et les sites web spécialisés) sont fournies dans le fichier additionnel ANNEXE II.

Raccourcis et limitations

Seuls les termes en anglais ont été inclus dans les requêtes de littérature. Cependant, les publications retenues étaient soit en anglais soit en français, en accord avec les compétences linguistiques de l'équipe. Aucune restriction de date ni de zone géographique n'a été appliquée aux recherches dans les bases de données. En ce qui concerne les sites web spécialisés, une recherche de documentation en anglais a été priorisée, avec l'ajout d'un seul site spécialisé en français.

Sources de littérature

Une seule base de données de publications a été consultée en utilisant l'équation de recherche décrite ci-dessus : la base de données « Web Of Science Core Collection » (WOSCC) accessible aux auteurs via l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD). La recherche a porté sur les index de citations suivants : SCI- EXPANDED, SSCI, AHCI, CPCI-S, CPCI-SSH, BKCI-S, BKCI-SSH, ESCI, CCR-EXPANDED, and IC.

Deux requêtes complémentaires ont été effectuées sur :

- Google Scholar (<https://scholar.google.com/>). Nous avons utilisé le programme logiciel "Publish or perish (version 6)" pour extraire les citations. En raison des restrictions du moteur de recherche concernant le nombre maximum de caractères, l'équation de recherche a été simplifiée. De plus, nous avons priorisé la littérature académique, limitant ainsi chaque sous-recherche aux 50 premiers résultats, car il a été démontré que la pertinence des documents identifiés diminue rapidement (Haddaway et al., 2015).
- Bielefeld Academic Search Engine (BASE) (<https://www.base-search.net>). De même que pour Google Scholar, étant donné les limitations en termes de nombre maximum de caractères, l'équation de recherche a été simplifiée.

Neufs sites spécialisés ont été consultés. Nous avons effectué une recherche manuelle de documentations techniques pertinentes sur les sept sites web suivants :

- The International Renewable Energy Agency (IRENA): <https://www.irena.org/>
- The Wind Technology Office: <https://www.energy.gov/eere/wind/wind-energy-technologies-office>
- The U.S. Wind Turbine Database: <https://eerscmap.usgs.gov/uswtodb/>
- The Bats and Wind Energy Cooperative (BWEC): <https://www.batsandwind.org>
- The 'Publication Library' of The Scotland Centre of Expertise Connecting Climate Change Research and Policy: <https://www.climateexchange.org.uk/research/publications-library/>
- Tethys: <https://tethys.pnnl.gov/>
- La Librairie "Energies renouvelables, réseaux et stockage", Agence de la Transition Ecologique (ADEME) <https://librairie.ademe.fr/2889-energies-renouvelables-reseaux-et-stockage>
- La page « Documentation et rapports », France Renouvelables : <https://www.france-renouvelables.fr/documentation-et-rapports/>
- The Mitigation Practices Database (MDP) Tool: <https://www.nyetwg.com/mpd-tool>

Estimation de l'exhaustivité de la recherche

Pour garantir la pertinence de la recherche, et un certain niveau d'exhaustivité, un processus itératif a été mené pour 'calibrer' l'équation de recherche par rapport à une liste prédéterminée de 10 articles de référence (ci-après dénommé « liste test »). Cette « liste test » était composée d'articles de journaux scientifiques pertinents, pré-identifiés par l'équipe. Nous avons testé différentes combinaisons de mots-clés et vérifié que les articles de référence étaient retrouvés. Si des articles de la « liste test » manquaient, des mots-clés étaient ajoutés pour améliorer sa sensibilité jusqu'à ce que tous les articles soient retrouvés.

Critères d'éligibilité des articles et de sélection des études

Deux étapes de tri ont été réalisées : 1) un tri sur « titres et résumés », et 2) un tri sur « résumés ». Nous avons examiné la pertinence des articles collectés à l'aide d'un ensemble de critères d'inclusion et d'exclusion (Tableau 2). Lors du tri sur titres et résumés, en cas de doute sur la présence d'un critère d'inclusion (ou si l'information était absente), l'article en question était automatiquement passé à l'étape suivante de sélection. Les rapports techniques récupérés par recherche manuelle sur les sites web d'organisations ont été évalués uniquement sur la base du texte intégral. Pour assurer la cohérence et la reproductibilité des décisions, la conformité aux critères d'éligibilité a été comparée entre plusieurs évaluateurs à l'aide d'un test de Kappa au début de chaque étape de tri (ANNEXE III).

Face à un nombre important de synthèses de connaissance éligibles aux critères de sélection, notamment concernant les impacts de l'éolien marin sur la biodiversité, et compte tenu du temps nécessaire à l'extraction des métadonnées de ce type de document, il était nécessaire de restreindre le périmètre d'analyse. Étant donné que les revues de littérature intègrent généralement les conclusions des travaux antérieurs, il a été décidé de n'en extraire qu'une partie, en ne conservant que les revues les plus récentes publiées à partir de 2021. Ne retenir que les revues postérieures à 2021 permet de rationaliser l'analyse sans perte significative d'information. Toutefois, une lecture préalable des revues plus anciennes a été réalisée afin de s'assurer qu'aucune information essentielle ne soit écartée. De plus, une comparaison des recommandations issues des revues publiées après 2021 avec celles extraites des études primaires a été effectuée afin de vérifier la cohérence et la continuité des recommandations dans le temps, identifier d'éventuelles évolutions dans les mesures proposées, et s'assurer qu'aucune mesure pertinente issue des études primaires ne soit absente des revues récentes.

Tableau 2. Liste des critères d'éligibilité utilisés pour la sélection sur titres / résumés et sur textes intégraux

Critères PICO		Description	Définition(s)
Critères d'inclusion	Populations éligibles	Tous les vertébrés et invertébrés volants (i.e toutes les espèces d'oiseaux et de chauves-souris, et d'insectes volants) affectés par les parcs éoliens marins.	Espèces sauvages – i.e., espèces en liberté présentes en milieux naturels (in-situ) ou espèces sauvages utilisées en laboratoires (ex-situ). Toutes espèces non domestiquées
	Interventions éligibles	Solutions d'atténuation pour éviter, minimiser et compenser les impacts des parcs éoliens marins sur la biodiversité volante.	Solutions d'atténuation visant à minimiser les impacts négatifs des parcs éoliens marins sur la biodiversité volante.
	Comparateurs éligibles	Présence de comparateur non nécessaire.	Evaluation formelle de l'efficacité des mesures non requises. Recommandations sur les mesures à adopter acceptées.
	Effets et mesures éligibles	Présence d'effets non nécessaire.	Etudes considérées même si aucun effet est étudié.
Critères d'exclusion	Populations inéligibles	Toute la faune non volante.	Les espèces sous-marines ne sont pas inclus dans cette revue.
	Interventions inéligibles	Solutions non axées sur l'évitement ou la réduction des effets négatifs.	Toute intervention qui n'est pas destinée à minimiser les impacts des parcs éoliens sur les populations d'espèces, que ce soit par des actions mises en œuvre directement sur les parcs ou par des mesures prises en amont, en aval ou en parallèle de leur exploitation.

	Résultats inéligibles	Aucune mention significatives de recommandations.	Etude ne contenant pas de recommandations claires ou détaillées concernant les mesures à adopter.
--	-----------------------	---	---

Analyse critique : évaluation de la validité des études

L'analyse critique de la validité des recherches repose habituellement sur l'examen des méthodologies employées, des données collectées et des biais potentiels. Toutefois, les informations extraites se limitent à des recommandations portant sur des mesures d'atténuation et des bonnes pratiques à adopter. Celles-ci ne s'appuient pas sur des résultats d'études spécifiques, mais plutôt sur des constats de certaines problématiques et impacts, ainsi que sur des propositions visant à les éviter, les atténuer ou les compenser. En l'absence de données méthodologiques et de résultats d'études détaillés, il n'a donc pas été possible de réaliser une analyse critique approfondie de la validité des travaux sous-jacents.

Synthèse narrative

Pour analyser les recommandations, nous avons constitué une base de données Excel où chaque proposition d'action ou d'information a été consignée en reprenant fidèlement le langage utilisé dans l'article. Dans le même temps, nous avons répondu à une série de questions permettant de synthétiser ces recommandations et de repérer d'éventuels biais présents dans la littérature actuelle.

Notamment, les recommandations ont été classées selon la nature des mesures préconisées, ainsi qu'une déclinaison plus spécifique de ces mesures (par exemple, « Taille de la turbine » pour la catégorie « Visibilité de la turbine »).

Les recommandations ont également été catégorisées en fonction des thématiques abordées et des approches mises en avant pour limiter les effets sur la biodiversité :

- *Outils de planification et d'évaluation des impacts* - Utilisation d'outils d'analyse spatiale, de cartes de sensibilité et d'autres méthodes pour orienter l'implantation des parcs éoliens en tenant compte des risques environnementaux.
- *Implantation et positionnement des éoliennes* - Sélection des sites d'installation en fonction de critères écologiques, afin d'éviter les habitats sensibles et les corridors de migration.
- *Politiques et réglementations* - Développement de cadres législatifs et réglementaires définissant des restrictions ou des conditions spécifiques pour l'implantation de projets en mer.
- *Adaptation des infrastructures* - Modifications des caractéristiques techniques des éoliennes et de leur conception pour limiter leur impact sur la faune (ex. : choix des matériaux, ajustement des structures).
- *Mesures technologiques ou techniques* - Intégration d'innovations technologiques pour réduire les interactions négatives entre les éoliennes et la biodiversité (ex. : installation de radars, arrêt automatique des pales en présence de certaines espèces).
- *Modifications opérationnelles* - Ajustement des modes de fonctionnement des parcs éoliens, incluant des changements dans les horaires d'activité (ex. : arrêts temporaires durant les périodes de migration) ou des réductions de la vitesse des pales.
- *Améliorations écologiques* - Mise en place de mesures permettant de compenser les effets des parcs éoliens, comme la création de nouveaux habitats ou le financement de projets de conservation.

- *Collaboration et gestion intégrée* - Développement de coopérations entre différents acteurs (États, chercheurs, exploitants, ONG) pour partager les connaissances, harmoniser les pratiques et optimiser la gestion des écosystèmes affectés.
- *Recherche et développement (R&D)* - Encouragement des études scientifiques et de l'innovation technologique pour mieux comprendre les effets des parcs éoliens offshore et améliorer les solutions d'atténuation.
- *Sensibilisation et formation* - Actions visant à informer et former les parties prenantes (exploitants, autorités, communautés locales) sur les enjeux environnementaux et les bonnes pratiques à adopter.

Une fois la base de données compilée, un travail d'harmonisation a été réalisé afin d'assurer la cohérence des catégories et de regrouper les déclinaisons similaires. Les enregistrements présentant des similitudes ont ensuite été consolidés, et un tableau a été établi pour répertorier les recommandations les plus fréquentes, classées selon leur occurrence globale.

En croisant les variables clés des métadonnées (par exemple, groupes biologiques x solutions x résultats), des figures et des tableaux de synthèse ont été produits pour identifier les lacunes de connaissances (c'est-à-dire les sous-thèmes nécessitant des recherches primaires supplémentaires) et les clusters de connaissances (c'est-à-dire les sous-thèmes suffisamment couverts par les études existantes pour permettre une synthèse quantitative).

Après l'extraction des différentes recommandations, un travail de rédaction a été entrepris afin de les synthétiser en un texte structuré. Cette étape a permis de présenter de façon cohérente les solutions identifiées et de mettre en lumière les points communs et divergents entre les sources. Elle a également facilité l'intégration des recommandations en vue d'établir des propositions opérationnelles claires et hiérarchisées.

ANNEXE II: DETAILS DES EQUATIONS DE RECHERCHE UTILISEES POUR LES REQUETES

Equation de recherche complète, utilisée avec Web Of Science core collection (WOSCC):

• TS=((insect\$ OR invertebrate\$ OR butterfly OR lepidoptera OR avifauna OR aves OR avian OR bird\$ OR bat\$ OR chiroptera OR passerine\$ OR raptor\$ OR passeriforme\$ OR seabird* OR shorebird* OR waterbird* OR "migratory bird*" OR gull* OR tern* OR petrel* OR shearwater* OR puffin*) AND ("wind energ*" OR "wind farm\$" OR "wind power" OR "wind turbine\$" OR "wind technolog*" OR "wind park\$" OR "wind power station\$" OR "wind power plant\$" OR "wind facilit*" OR "wind installation\$") AND (evaluat* OR solution\$ OR mitigat* OR assessment* OR option\$ OR measur* OR priorit* OR reduc* OR avoid* OR compensat* OR minimize OR adapt* OR interven* OR action\$ OR manag* OR protect* OR manipul* OR counteract* OR removal OR engineer* OR plan* OR strateg* OR offset* OR curtail* OR "flight divert*" OR "attract* remov*" OR "nest* management" OR "m?crossing" OR deterr* OR "habitat restoration*" OR "habitat enhancement*" OR "habitat creation*" OR "ecological engineering" et "conservation strateg*" OR "site selection*" OR "displacement*" OR "buffer zone*») AND (impact* OR effect* OR collision\$ OR behavior* OR aversion OR repulsion OR disturb* OR mortalit* OR fatalit* OR carcass* OR "population size" OR "population density" OR abundance OR occurrence OR habitat loss* OR fragmentation* OR degradation* OR response OR disruption* OR success* OR breeding OR nesting OR reproduct* OR fidelit* OR site OR richness* OR composition* OR lifespan OR surviv* OR rate) AND (offshore OR sea OR marine OR ocean OR coastal OR "continental shelf» OR tidal OR pelagic OR intertidal OR estuar*))

Equation de recherche simplifiée dérivée de l'équation complète initiale, utilisée avec Bielefeld Academic Search Engine (BASE) :

• (insect invertebrate butterfly lepidoptera avifauna aves avian bird bat chiroptera passerine raptor passeriforme seabird shorebird waterbird "migratory bird" gull tern petrel shearwater puffin duck swan sandpiper coot guillemot plover cormorant grebe skua) AND (offshore sea marine ocean coastal "continental shelf" tidal pelagic intertidal estuary) AND ("wind energy" "wind farm" "wind power" "wind turbine" "wind technology" "wind park" "wind facility" "wind installation") AND (evaluation solution mitigation assess option measure priority reduce avoid compensate minimize adapt intervention action management protect manipulate counteract removal engineer plan strategy offset curtailment displacement buffer siting deterrent habitat)

Equations de recherche simplifiées et découpées, dérivées de l'équation complète initiale, utilisées avec Google Scholar :

• (insect OR bat OR chiroptera) AND ((offshore OR marine) AND (wind AND (energy OR farm OR turbine OR park))) AND (evaluat* OR mitigat* OR assessment OR measur* OR reduc* OR avoid* OR compensat*) AND (impact OR effect OR collision OR behavior OR mortality OR fatality OR density)

• (insect OR bat OR chiroptera) AND ((offshore OR marine) AND (wind AND (energy OR farm OR turbine OR park))) AND (evaluat* OR mitigat* OR assessment OR measur* OR reduc* OR avoid* OR compensat*) AND (abundance OR success OR breeding OR richness OR composition OR surviv* OR rate)

• (insect OR bat OR chiroptera) AND ((offshore OR marine) AND (wind AND (energy OR farm OR turbine OR park))) AND (minimize OR manag* OR plan* OR offset OR siting OR restoration OR creation OR "buffer zone") AND (impact OR effect OR collision OR behavior OR mortality OR fatality OR density)

- (insect OR bat OR chiroptera) AND ((offshore OR marine) AND (wind AND (energy OR farm OR turbine OR park))) AND (minimize OR manag* OR plan* OR offset OR siting OR restoration OR creation OR “buffer zone”) AND (abundance OR success OR breeding OR richness OR composition OR surviv* OR rate)
- (bird OR seabird OR shorebird OR “migratory bird”) AND ((offshore OR marine) AND (wind AND (energy OR farm OR turbine OR park))) AND (evaluat* OR mitigat* OR assessment OR measur* OR reduc* OR avoid* OR compensat*) AND (impact OR effect OR collision OR behavior OR mortality OR fatality OR density)
- (bird OR seabird OR shorebird OR “migratory bird”) AND ((offshore OR marine) AND (wind AND (energy OR farm OR turbine OR park))) AND (evaluat* OR mitigat* OR assessment OR measur* OR reduc* OR avoid* OR compensat*) AND (abundance OR success OR breeding OR richness OR composition OR surviv* OR rate)
- (bird OR seabird OR shorebird OR “migratory bird”) AND ((offshore OR marine) AND (wind AND (energy OR farm OR turbine OR park))) AND (minimize OR manag* OR plan* OR offset OR siting OR restoration OR creation OR “buffer zone”) AND (impact OR effect OR collision OR behavior OR mortality OR fatality OR density)
- (bird OR seabird OR shorebird OR “migratory bird”) AND ((offshore OR marine) AND (wind AND (energy OR farm OR turbine OR park))) AND (minimize OR manag* OR plan* OR offset OR siting OR restoration OR creation OR “buffer zone”) AND (abundance OR success OR breeding OR richness OR composition OR surviv* OR rate)

ANNEXE III: EVALUATION DE LA CONFORMITE AUX CRITERES D'ELIGIBILITE PAR LES TESTS KAPPA DE FLEISS ET DE RANDOLPH

Test Kappa de Fleiss sur appliqué conjointement sur les titres et résumés:

- Trois évaluateurs ont réalisé le test sur une liste de 10 références bibliographiques, après un premier test de calibration portant également sur 10 références afin d'harmoniser les décisions de sélection.
- Résultats : $Kappa = 0,72$
 $z = 3,22$
 $p\text{-value} = 0,0013$

La valeur de Kappa de 0,72 suggère un haut niveau d'accord entre les évaluateurs, proche du seuil de 0.75 généralement considéré comme indiquant une excellente concordance. De plus, cet accord observé entre les évaluateurs est extrêmement significatif sur le plan statistique ($p\text{-value} = 0,0013$).

Test Kappa de Randolph sur textes entiers :

- Le test a été effectué par deux évaluateurs sur une liste de 10 références bibliographiques. Le Kappa de Randolph a été choisi, car il est plus adapté aux analyses avec deux évaluateurs, contrairement au Kappa de Fleiss, conçu pour plusieurs évaluateurs.
- Résultats : $Kappa = 0,8$
 $z = 4,22$
 $p\text{-value} < 0,001$

Sur ce test, la valeur de Kappa de 0.80 montre un très haut niveau d'accord entre les évaluateurs avec un accord observé entre les évaluateurs toujours extrêmement significatif ($p\text{-value} < 0,001$).

Les résultats des tests de Kappa révèlent une forte concordance entre les évaluateurs à chaque étape de la sélection des références bibliographiques. Que ce soit pour le tri sur les titres et résumés ($Kappa = 0,72$) ou sur les textes entiers ($Kappa = 0.80$), les valeurs de Kappa indiquent une cohérence significative et reproductible dans les décisions des évaluateurs. Cette cohérence garantit la fiabilité et la robustesse de l'évaluation des critères d'éligibilité tout au long du processus de sélection des références bibliographiques.