

Éoliennes en mer & biodiversité

ESCo - EFFETS
DES PARCS ÉOLIENS
EN MER ET DE LEURS
RACCORDEMENTS
SUR LA BIODIVERSITÉ

— SYNTHÈSE —

Cette expertise a été sollicitée par les ministères chargés de l'énergie, de la transition écologique, et de la mer. L'étude a été conduite conjointement par l'Ifremer et le CNRS dans le cadre d'une Expertise scientifique collective (ESCO). Le rapport d'expertise et la présente synthèse ont été élaborés par un collectif pluridisciplinaire d'expert·es scientifiques sans condition d'approbation préalable par les commanditaires, ni les organismes Ifremer et CNRS. Ils n'engagent que la responsabilité de leurs auteur·ices.

Les documents relatifs à cette expertise sont disponibles sur les sites web de l'Ifremer (<https://www.ifremer.fr>) et du CNRS (<https://www.cnrs.fr>) :

Rapport d'expertise scientifique : [lien]

Synthèse de l'expertise scientifique : [lien]

Résumé de l'expertise scientifique : [lien]

Directeurs de publication

François HOULLIER, Président directeur général de l'Ifremer

Thierry DAUXOIS, Président directeur général du CNRS

Sous la coordination de l'Ifremer et du CNRS, les expert·es et auteur·ices qui ont contribué à cette expertise

Pilotes scientifiques

Nathalie NIQUIL, CNRS. UMR 6143 Morphodynamique continentale et côtière (M2C)

Cédric BACHER, Ifremer. Dynamiques des écosystèmes côtiers (DYNECO)

Membres du collectif d'expert·es

Matthieu AUTHIER, La Rochelle Université. UAR 3462 Observatoire pour la conservation de la mégafaune marine (Pelagis) – **Sakina-Dorothée AYATA**, Sorbonne Université. UMR 7159 Laboratoire d'océanographie et du climat : expérimentations et approches numériques (LOCEAN) – **Catherine BOEMARE**, École des hautes études en sciences sociales (EHESS). UMR 8568 Centre international de recherche sur l'environnement et le développement (CIRED) – **Arthur CAPET**, Institute of Natural Sciences (RBINS). Ecosystem modelling group (ECOMOD) – **Christelle CAPLAT**, Université de Caen Normandie. UR 7482 Marine ecosystems and organisms research lab (MERSEA) – **Antoine CARLIER**, Ifremer. Dynamiques des écosystèmes côtiers (DYNECO) – **Peter DAVIES**, Ifremer. Laboratoire structures, matériaux avancés et sollicitations hyperbares (SMASH) – **Steven DEGRAER**, Institute of Natural Sciences (RBINS). Marine ecology and management (MARECO) – **Sophie DE GRISSAC**, Muséum national d'Histoire naturelle (MNHN). UMR 7204 Centre d'écologie et des sciences de la conservation (CESCO) – **Pierre GERNEZ**, Nantes Université. UR 2160 Institut des substances et organismes de la mer (ISOMer) – **Sean HEIGHTON**, CNRS. UMR 6143 Morphodynamique continentale et côtière (M2C) – **Youenn JÉZÉQUEL**, Université de Bretagne Occidentale. UMR 6539 Laboratoire des sciences de l'environnement marin (LEMAR) – **Jean-Luc JUNG**, Muséum national d'Histoire naturelle (MNHN). UMR 7205 Institut de systématique, évolution, biodiversité (ISYEB) – **Christian KERBIRIOU**, Sorbonne Université. UMR 7204 Centre d'écologie et des sciences de la conservation (CESCO) – **Raphaël LAMI**, Sorbonne Université. UMR 8176 Laboratoire de biodiversité et biotechnologies microbiennes (LBBM) – **Philippe LENFANT**, Université de Perpignan Via Domitia. UMR 5110 Centre de formation et de recherche sur les environnements méditerranéens (CEFREM) – **Sylvain PIOCH**, Université Paul-Valéry Montpellier 3. Laboratoire de géographie et d'aménagement de Montpellier (LAGAM) – **Aurore RAOUX**, Université de Caen Normandie. UMR 6143 Morphodynamique continentale et côtière (M2C) – **Alexei SENTCHEV**, Université du Littoral Côte d'Opale. UMR 8187 Laboratoire d'océanologie et de géosciences (LOG) – **Laure SIMPLET**, Ifremer. UMR 6538 Geo-Ocean – **Pierre THIRIET**, Office français de la biodiversité (OFB). UAR 2006 Centre d'expertise et de données sur le patrimoine naturel (PatriNat) – **Frédérique VIARD**, CNRS. UMR 5554 Institut des sciences de l'évolution de Montpellier (ISEM) – **Camille VOGEL**, Ifremer. Laboratoire ressources halieutiques de Port-en-Bessin (LRHPB).

Coordination de l'expertise

Eugénie CAZAUX, Ifremer. Coordination de l'expertise en Appui aux politiques publiques (APP)

Pilotage Ifremer et CNRS

Coordination de l'expertise en Appui aux politiques publiques (APP) – Ifremer

Olivier LE PIVERT, Délégué à la coordination de l'expertise en Appui aux politiques publiques (APP) – **Marion CUIF**, Coordinatrice énergies marines renouvelables.

Mission pour l'expertise scientifique (MPES) – CNRS

Valérie LALLEMAND-BREITENBACH, Directrice de la Mission pour l'expertise scientifique – **Aude VÉDRINES**, **Florence LAFAY-DUFOUR** et **Adeline NAZARENKO**, Responsables de la conduite des expertises.

Pour citer ce document

Eugénie Cazaux (coord.), Nathalie Niquil (coord.), Cédric Bacher (coord.), Matthieu Authier, Sakina-Dorothée Ayata, Catherine Boemare, Arthur Capet, Christelle Caplat, Antoine Carlier, Peter Davies, Steven Degraer, Sophie De Grissac, Pierre Gernez, Sean Heighton, Youenn Jézéquel, Jean-Luc Jung, Christian Kerbiriou, Raphaël Lami, Philippe Lenfant, Sylvain Pioch, Aurore Raoux, Alexei Sentchev, Laure Simplet, Pierre Thiriet, Frédérique Viard, Camille Vogel (2026). *Éoliennes en mer & biodiversité. Synthèse de l'expertise scientifique collective*. Ifremer – CNRS (France), 158 p.

Table des matières

AVANT-PROPOS	4
INTRODUCTION.....	6
PARTIE 1 Cadrage de l'expertise	12
1. Cadre d'analyse et éléments de contexte : technologies d'éoliennes en mer, pressions associées et biodiversité marine	13
PARTIE 2 Cadre méthodologique de la revue systématique et résultats de la cartographie de la littérature.....	24
1. Cadre méthodologique : la revue systématique de la littérature	25
2. Résultats généraux de la cartographie de la littérature	29
PARTIE 3 L'analyse des résultats « pression par pression ».....	38
1. Structures en tant qu'obstacle physique au déplacement (effet barrière et collisions).....	39
2. Introduction de substrats durs artificiels	46
3. Modification des habitats benthiques	52
4. Modification des habitats pélagiques.....	58
5. Émissions de substances chimiques	63
6. Émissions sonores.....	69
7. Autres introductions d'énergies : champs électromagnétiques, lumière artificielle, chaleur ...	74
8. Pressions à l'échelle des paysages marins.....	81
9. Introduction d'espèces non indigènes	87
10. Modification des activités de pêche.....	92
PARTIE 4 - Mesures d'atténuation et enjeux transverses (cumul d'effets, incertitudes, transposabilité).....	100
1. Mesures d'atténuation des effets environnementaux et propositions d'améliorations socio-écologiques	101
2. Enjeux transverses : évaluer les effets cumulés, réduire les incertitudes, identifier les conditions de transposabilité aux eaux de France hexagonale	109
BILAN DE L'ESCO	118
GLOSSAIRE	126
SIGLES ET ABRÉVIATIONS	138
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES CITÉES	140
COLLECTIF DE TRAVAIL	154

AVANT-PROPOS

L'expertise scientifique collective (ESCo) relative aux effets des parcs éoliens en mer sur la biodiversité marine s'inscrit à l'interface de deux grands défis contemporains : la lutte contre le changement climatique et la préservation de la biodiversité. Ces deux enjeux sont aujourd'hui portés à l'échelle internationale par les travaux du Groupe d'expert·es intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) et de la Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques (IPBES).

Le GIEC rappelle, dans son sixième rapport d'évaluation, que la limitation des effets du changement climatique repose d'abord sur la sobriété énergétique et la réduction des consommations, mais implique également une décarbonation profonde des systèmes énergétiques, fondée sur une diminution rapide du recours aux énergies fossiles. Dans ce contexte, les énergies marines renouvelables, et en particulier l'éolien en mer, constituent l'un des leviers identifiés pour accompagner les trajectoires d'évolution énergétique en France et en Europe, notamment lorsque les espaces terrestres sont déjà fortement sollicités par des usages concurrents.

Cette dynamique ne peut toutefois être envisagée indépendamment des objectifs de préservation du vivant. L'IPBES identifie cinq grandes pressions directes responsables de l'érosion de la biodiversité : l'exploitation directe des organismes, les changements d'usage des terres et de la mer, le changement climatique, la pollution et les espèces exotiques envahissantes. Dans les milieux marins, sa première évaluation mondiale publiée en 2019 souligne que l'exploitation directe des organismes — principalement la pêche — constitue la première pression, suivie des changements d'usage de la mer, catégorie dans laquelle s'inscrivent les infrastructures offshore telles que les parcs éoliens en mer.

L'enjeu scientifique consiste dès lors à mieux comprendre comment ces nouvelles infrastructures interagissent avec des écosystèmes marins complexes, caractérisés par la diversité des processus biophysiques, la multiplicité des usages et des dynamiques écologiques déployées à différentes échelles spatiales et temporelles. Il s'agit de documenter de manière rigoureuse les effets associés au développement de l'éolien en mer, afin d'éclairer les conditions dans lesquelles les trajectoires d'évolution des systèmes énergétiques peuvent être conciliées avec les objectifs de préservation du vivant.

INTRODUCTION

Contexte de la commande

Le développement des parcs éoliens en mer occupe une place croissante dans les stratégies nationale et européenne d'évolution du système énergétique. L'implantation de ces infrastructures en milieu marin s'inscrit toutefois dans des écosystèmes caractérisés par une forte complexité écologique (nombreuses interactions entre organismes, milieux fluides en trois dimensions), des difficultés d'accès à leur observation et la coexistence de multiples usages anthropiques (pêche, transport maritime, extraction de granulats, etc.). Dans ce contexte, le déploiement de l'éolien en mer génère différentes pressions susceptibles d'affecter les composantes de la biodiversité ainsi que le fonctionnement des socio-écosystèmes marins et côtiers.

Ces interactions entre les parcs éoliens en mer et l'environnement marin ont fait l'objet d'un nombre croissant de publications scientifiques au cours des deux dernières décennies, notamment dans les pays d'Europe du Nord, où l'éolien en mer est déployé depuis plusieurs années, dans un contexte d'accroissement rapide des connaissances scientifiques disponibles sur ces questions. La littérature met en évidence des effets variables selon les types de pressions, les organismes vivants étudiés, les contextes écologiques et les phases de développement des parcs (prospection, construction, exploitation, démantèlement).

Alors que le déploiement des parcs éoliens en mer est déjà engagé dans de nombreux pays et connaît une accélération rapide, il n'existait jusqu'à présent aucune synthèse intégrée permettant de dresser un état des connaissances scientifiques sur les effets de ces infrastructures sur la biodiversité marine. Ce besoin de connaissances s'est notamment exprimé lors des débats publics relatifs aux projets de parcs éoliens en mer en France, ainsi que dans le cadre du débat public national « *La mer en débat* », où les enjeux de compatibilité entre transition énergétique, biodiversité et usages maritimes occupent une place centrale. Afin d'inscrire le développement des énergies marines renouvelables dans une trajectoire compatible avec les objectifs de préservation de la biodiversité marine, il apparaît essentiel de disposer d'une synthèse rigoureuse, impartiale et intégrée permettant de clarifier l'état des connaissances, d'identifier les principaux verrous scientifiques et d'éclairer les choix publics relatifs à la planification et à l'encadrement du déploiement de l'éolien en mer.

Demande d'expertise

C'est dans ce contexte que l'Ifremer et le CNRS ont été mandatés, par lettre de saisine du 28 avril 2023 émanant des ministères chargés de l'énergie, de la transition écologique et de la mer, pour conduire une Expertise scientifique collective (ESCo) consacrée aux effets des parcs éoliens en mer sur la biodiversité marine et les socio-écosystèmes marins et côtiers. Cette expertise constitue une action identifiée pour son concours aux missions de l'Observatoire national de l'éolien en mer (ONEM) et bénéficie, à ce titre, d'un soutien du ministère en charge de l'énergie. Créé en 2022 par les trois ministères commanditaires de l'ESCo, l'ONEM a pour objectif d'éclairer le débat public sur les impacts environnementaux des parcs éoliens en mer en valorisant les connaissances existantes et en soutenant le développement de nouveaux programmes d'acquisition de connaissances. Conformément aux chartes de l'expertise et de l'avis de l'Ifremer et du CNRS, les travaux ont été menés en toute indépendance vis-à-vis de l'Observatoire. Débutée en janvier 2024, l'expertise a été coordonnée conjointement par la Coordination à l'appui aux politiques publiques (APP) de l'Ifremer et la Mission pour l'expertise scientifique (MPES) du CNRS.

L'ESCo « *Éoliennes en mer & biodiversité* » a pour objectif principal d'établir un état des lieux et une synthèse critique des connaissances scientifiques disponibles sur les effets des parcs éoliens en mer et de leurs infrastructures de raccordement, dans l'ensemble de leurs dimensions. Elle analyse les effets des différentes pressions associées à ces aménagements, à différentes échelles de temps et d'espace, sur les composantes physiques et biologiques de la biodiversité, ainsi que sur les socio-écosystèmes marins et côtiers, entendus ici comme les interactions entre les écosystèmes marins et les activités humaines dès lors qu'elles peuvent influencer directement ou indirectement la biodiversité, notamment lorsque l'implantation de parcs éoliens modifie d'autres usages ou activités ayant eux-mêmes des effets sur celle-ci.

L'ESCO couvre l'ensemble du cycle de développement des parcs, incluant les phases de prospection, de construction, d'exploitation et de démantèlement, ainsi que les dynamiques de récupération écologique après la fin de vie des installations.

La saisine vise à clarifier l'état des connaissances disponibles, en distinguant les acquis de la recherche, les incertitudes, les controverses scientifiques ainsi que les principales lacunes de connaissances. Elle intègre également plusieurs enjeux transversaux majeurs :

- La prise en compte du cumul d'effets, dans un contexte où les pressions générées par l'éolien en mer peuvent interagir entre elles, mais également avec celles issues d'autres activités anthropiques ou avec les effets du changement climatique, sur fond d'érosion de la biodiversité ;
- L'évaluation du niveau d'incertitude associé aux connaissances disponibles, l'identification des effets faisant l'objet de controverses et la mise en évidence des besoins de recherche ;
- Une attention particulière portée à la transposabilité des résultats aux écosystèmes marins de France hexagonale, la majorité des études disponibles provenant de régions d'Europe du Nord et de l'Atlantique Nord, tandis que certaines zones, comme la Méditerranée, ainsi que des technologies plus récentes telles que l'éolien flottant, demeurent encore peu documentées.

L'analyse des enjeux propres aux territoires ultramarins ne relevait quant à elle pas du périmètre de l'ESCO. Si le travail d'analyse bibliographique peut constituer une base commune, l'évaluation de la transposabilité des résultats à ces territoires nécessiterait une expertise complémentaire, mobilisant des spécialistes des écosystèmes et des territoires concernés.

Les conclusions de l'ESCO « *Éoliennes en mer & biodiversité* » visent à constituer un appui scientifique de référence, en apportant un partage structuré des connaissances existantes, un éclairage scientifique aux décisions publiques relatives au déploiement de l'éolien en mer en France, plus largement utile aux multiples acteurs du domaine, ainsi qu'une identification des besoins de recherche.

Principes de l'Expertise Scientifique Collective (ESCO)

Une Expertise scientifique collective (ESCO) a pour objet d'établir un état des lieux et une analyse critique des connaissances scientifiques disponibles à l'échelle internationale sur une question sociétale complexe présentant des enjeux de décision publique. Elle vise à rassembler, analyser et structurer un vaste corpus pluridisciplinaire de travaux scientifiques afin d'en dégager les principaux constats, d'identifier les convergences et divergences de résultats, ainsi que les incertitudes, controverses et lacunes de connaissances. Les ESCo constituent ainsi un outil d'appui aux politiques publiques. Elles ne visent pas à formuler des recommandations, qu'elles soient ou non à visée normative, mais à mettre en cohérence et en perspective des connaissances scientifiques dispersées afin d'éclairer la réflexion et le débat publics, sans se substituer aux choix collectifs ni aux arbitrages sociétaux auxquels ces questions renvoient.

La conduite de cette ESCo sur les effets des parcs éoliens en mer sur la biodiversité marine s'inscrit dans les principes généraux des expertises scientifiques collectives portées par les organismes publics de recherche, notamment l'Ifremer et le CNRS. Ces principes reposent en particulier sur :

- La compétence scientifique, assurée par la sélection d'un collectif pluridisciplinaire d'experts sur la base de leurs publications et de leur reconnaissance académique ;
- L'indépendance et l'impartialité, garanties par une vigilance particulière portée aux liens d'intérêts et à l'équilibre des points de vue au sein du collectif ;
- La transparence, fondée sur la traçabilité des sources mobilisées, la description explicite des méthodes utilisées et la mise à disposition publique des résultats de l'expertise ;

- La rigueur méthodologique, reposant sur des cadres standardisés de revue et de synthèse des connaissances, visant à limiter les biais et à renforcer la robustesse des conclusions.

L'ESCO se distingue ainsi d'une revue narrative ou d'un rapport d'expertise ponctuel par son caractère structuré, collectif et critique. Elle a vocation à constituer un socle scientifique partagé, mobilisable dans la durée pour accompagner l'action publique, identifier les besoins de recherche et renforcer les capacités d'analyse et d'aide à la décision sur des enjeux sociétaux complexes.

Composition du collectif d'expert·es

L'ESCO « *Éoliennes en mer & biodiversité* » repose sur un collectif pluridisciplinaire de 25 membres, composé de 22 chercheur·ses, de deux pilotes scientifiques (Cédric Bacher – Ifremer et Nathalie Niquil – CNRS) et d'un chercheur postdoctoral (Sean Heighton) en appui à la conduite de la revue systématique. Ce collectif a été constitué afin de couvrir l'ensemble du périmètre scientifique de la saisine. L'expertise a été coordonnée et animée par une cheffe de projet (Eugénie Cazaux), avec l'appui de trois documentalistes des services d'information scientifique et technique de l'Ifremer et du CNRS (Isabelle Clauss, Megan Quimbre et Patricia Mahafaka Ranoarisoa). Les travaux de l'expertise ont également bénéficié de la contribution de quatre stagiaires de master.

La sélection des expert·es s'est appuyée sur une analyse bibliométrique des champs thématiques à couvrir, complétée par des échanges avec plusieurs scientifiques francophones du domaine. Cette démarche a permis de constituer un collectif réunissant des compétences variées en écologie marine, océanographie, acoustique, géologie, chimie et modélisation, ainsi qu'en sciences humaines et sociales, notamment en économie et en géographie.

Le collectif est majoritairement issu des sciences de la nature (92 %), l'écologie représentant la discipline la plus fortement mobilisée (72 %). Les expert·es appartiennent principalement à des établissements de recherche publique (Ifremer, CNRS, universités, MNHN, EHESS), dont deux experts belges issus de l'Institute of Natural Sciences (RBINS). Cette composition assure à la fois une expertise disciplinaire approfondie et une ouverture internationale.

Conformément aux principes de l'expertise scientifique collective, une analyse des déclarations de liens d'intérêts a été conduite pour l'ensemble du collectif afin de garantir la transparence et l'impartialité de l'expertise. Ce processus vise à assurer une composition équilibrée du collectif et à prévenir toute situation susceptible d'influencer l'appréciation scientifique ou d'affecter la crédibilité des conclusions.

Les réseaux de collaboration scientifique des membres du collectif, ainsi que la diversité de leurs publications récentes couvrant un large éventail de thématiques liées aux différentes pressions et aux différents compartiments biologiques étudiés (mammifères marins, oiseaux, habitats, bruit, lumière artificielle, changement climatique, etc.), témoignent par ailleurs de leur insertion active dans les dynamiques internationales de recherche.

Corpus scientifique et démarche de revue systématique

La synthèse systématique des données probantes est une approche visant à rassembler et analyser les connaissances disponibles selon une démarche rigoureuse, exhaustive, transparente et reproductible. Elle consiste à identifier, sélectionner, coder — c'est-à-dire extraire et renseigner de manière standardisée, dans un tableur structuré selon des catégories prédéfinies, les principales caractéristiques et résultats des études retenues — puis synthétiser les informations issues de la littérature scientifique à partir de protocoles explicitement définis.

Cette démarche vise à limiter les biais liés au processus de sélection et d'interprétation des publications, à garantir la transparence de la méthode d'analyse, et à en permettre la répétabilité. Dans le cadre de cette expertise, la revue systématique constitue ainsi un socle méthodologique central, permettant de dresser un état des lieux structuré des connaissances scientifiques relatives aux effets des parcs éoliens en mer sur la biodiversité marine et les socio-écosystèmes marins et côtiers. L'approche adoptée s'inscrit dans les standards du *Centre for Environmental*

Evidence (CEE) et repose sur une succession d'étapes clairement identifiées qui seront détaillées dans la section relative au cadre méthodologique.

La constitution du corpus bibliographique s'est appuyée sur une stratégie de recherche systématique et exhaustive, conduite dans plusieurs bases de données bibliographiques internationales, visant à identifier la littérature scientifique évaluée par les pairs et publiée dans des revues à comité de lecture. Cette démarche a permis d'identifier un corpus initial de 4 567 références scientifiques, qui a ensuite fait l'objet d'un processus progressif de sélection visant à retenir les publications pertinentes pour l'analyse.

Par rapport aux synthèses existantes, cette approche présente également plusieurs apports méthodologiques majeurs. Elle propose une cartographie intégrée et transversale des connaissances, couvrant simultanément l'ensemble des pressions identifiées et l'ensemble des composantes de la biodiversité, permettant ainsi une lecture systémique des effets observés.

Compte tenu du large périmètre de l'expertise, cette revue systématique a enfin été complétée, pour certains volets thématiques, par une mobilisation ciblée de littérature additionnelle afin d'intégrer des éléments de contexte, une analyse de pressions analogues, ainsi que des références méthodologiques nécessaires à l'interprétation globale des résultats. Les pressions analogues renvoient à des pressions proches de celles générées par l'éolien en mer, permettant d'éclairer, par analogie, les effets potentiels lorsque les données spécifiques étaient limitées. Cette littérature complémentaire a été mobilisée selon deux modalités : d'une part, par la mise en œuvre d'équations de recherche bibliographique complémentaires ciblant spécifiquement certains objets insuffisamment couverts par la revue systématique principale ; d'autre part, sur la base des connaissances et de l'expertise du collectif d'expert·es, permettant d'identifier des références scientifiques ou techniques jugées pertinentes pour éclairer l'analyse. Cette littérature additionnelle comprend principalement de la littérature scientifique évaluée par les pairs. Quelques exceptions ont toutefois été faites lorsque nécessaire, en intégrant ponctuellement des analyses synthétiques non publiées dans la littérature scientifique, mais jugées de haute qualité par le collectif d'expert·es (rapports techniques, documents institutionnels, etc.). Cette littérature dite « grise » désigne de manière générale des documents produits par l'administration, l'industrie, l'enseignement supérieur et la recherche, les services, les ONG ou les associations, qui ne relèvent pas des circuits habituels d'édition scientifique et de diffusion commerciale. Elle comprend notamment des rapports institutionnels, des études, des synthèses, des thèses et des actes de conférences.

Structure de la Synthèse

La Synthèse reprend la même logique d'organisation que le rapport d'expertise scientifique complet, afin de garantir une continuité de lecture entre les différents niveaux de détail (Synthèse ↔ Rapport d'expertise). Elle articule ainsi, de manière progressive, (i) un cadrage de l'expertise et des principaux éléments de contexte, (ii) la construction et la cartographie du corpus scientifique de la revue systématique de la littérature, (iii) l'analyse des résultats pression par pression, puis (iv) une mise en perspective transversale des principaux enjeux.

La première partie propose un cadrage général de l'expertise en présentant le cadre d'analyse retenu et les principaux éléments de contexte nécessaires à la lecture des résultats. Elle explicite les grandes caractéristiques des technologies d'éoliennes en mer considérées, les différentes phases de développement des parcs éoliens en mer, les pressions associées à leur présence ou à leur fonctionnement, ainsi que les dimensions de la biodiversité marine mobilisées dans l'analyse.

La deuxième partie présente la démarche de revue systématique de la littérature (RSL), qui constitue le socle méthodologique de l'expertise : elle explicite la constitution du corpus, les critères de sélection, le codage et les principaux enseignements de la cartographie de la littérature, afin de rendre visibles à la fois la robustesse du socle de preuves mobilisé et les déséquilibres du corpus (pressions inégalement documentées, groupes biologiques inégalement étudiés, variations géographiques ou phases de développement différemment couvertes).

La troisième partie constitue le cœur analytique de la Synthèse et reprend l'examen des résultats pression par pression selon un fil directeur commun, afin de faciliter les comparaisons et de permettre une lecture transversale de l'ensemble : description de la pression et des hypothèses d'effets associées, présentation du corpus de la revue systématique mobilisé, état des connaissances scientifiques, incertitudes et lacunes identifiées, contextualisation des résultats à partir de la littérature complémentaire, puis messages-clés conclusifs.

Les principaux résultats de l'ESCO sont présentés selon une logique de progression spatiale, allant des structures éoliennes elles-mêmes vers des dynamiques intervenant à des échelles plus larges, afin de rendre compte de la diversité des mécanismes par lesquels les pressions peuvent s'exercer. La présentation des résultats par pression est ainsi organisée dans l'ordre suivant : Structures en tant qu'obstacle physique au déplacement (effet barrière et collisions) ; Introduction de substrats durs artificiels ; Modification des habitats benthiques ; Modification des habitats pélagiques ; Émissions de substances chimiques ; Émissions sonores ; Autres introductions d'énergies : champs électromagnétiques, lumière artificielle, chaleur ; Pressions à l'échelle des paysages marins ; Introduction d'espèces non indigènes ; Modification des activités de pêche.

Les hypothèses d'effets formulées pour chaque pression ont une fonction de cadrage analytique : elles permettent d'explicitier les mécanismes attendus, les voies d'exposition plausibles et les récepteurs biologiques concernés, sans constituer une présomption de résultat ni préjuger de l'existence ou de l'ampleur des effets effectivement observés. Les exemples bibliographiques ponctuellement mobilisés ont une vocation illustrative : leur citation vise à éclairer certains résultats de manière représentative ou éclairante, sans qu'ils correspondent nécessairement aux études les plus robustes du corpus. Le degré de développement consacré à la littérature complémentaire peut par ailleurs varier selon les pressions, en fonction de la densité du corpus issu de la revue systématique : lorsque celui-ci est limité, le recours à cette littérature peut être plus substantiel afin de contextualiser les résultats ; à l'inverse, lorsqu'il est plus abondant, l'analyse repose prioritairement sur les données directement issues de la revue systématique.

Certaines métriques, telles que le nombre d'espèces (richesse spécifique) ou la diversité des groupes biologiques (diversité taxonomique), ne doivent enfin pas être interprétées de manière univoque, en raison du caractère multidimensionnel de la biodiversité. Une augmentation locale du nombre d'espèces ne constitue pas nécessairement un effet favorable à l'échelle de l'écosystème, car elle peut s'accompagner de modifications fonctionnelles, d'une homogénéisation biotique ou de transformations des réseaux trophiques. L'interprétation des résultats repose donc sur une analyse contextualisée, cohérente avec le cadre conceptuel retenu.

Enfin, la quatrième partie propose une lecture transversale des principaux enseignements, en abordant les mesures d'atténuation décrites dans la littérature, les leviers mobilisables pour l'action publique, ainsi que plusieurs enjeux intégrateurs tels que les effets cumulés, les incertitudes et les conditions de transposabilité des résultats aux écosystèmes marins de France hexagonale.

PARTIE 1

Cadrage de l'expertise

1. Cadre d'analyse et éléments de contexte : technologies d'éoliennes en mer, pressions associées et biodiversité marine

Les principales composantes d'un parc éolien en mer

Dans le cadre du présent travail, un parc éolien en mer est appréhendé comme un système d'infrastructures interconnectées, dont les effets potentiels ne se limitent pas aux seules turbines. Ce système comprend les structures de production, leurs dispositifs de fixation ou d'ancrage, les infrastructures électriques associées, ainsi que les aménagements et activités logistiques à terre et en mer (Figure 1).

Structures de production : éolien posé

Les éoliennes dites posées reposent sur une structure métallique ou en béton fixée au fond marin (la fondation), sur laquelle est installée une tour supportant un rotor à trois pales entraînant un générateur situé dans une nacelle placée à son sommet. Trois principaux types de fondations sont couramment utilisés :

- La fondation monopieu (monopile) : tube en acier battu ou foré dans le fond marin, pouvant atteindre environ 10 m de diamètre et être enfoncé jusqu'à 30 m ou plus. Il s'agit de la technologie la plus répandue en Europe, privilégiée en faibles profondeurs (généralement < 15–30 m selon les conditions géotechniques) ;
- La fondation jacket : structure en treillis métallique fixée au fond par trois ou quatre pieux, adaptée aux profondeurs intermédiaires, généralement comprises entre 30 et 60 m ;
- La fondation gravitaire : socle massif en béton reposant sur le fond marin, stabilisé par son propre poids.

Afin de limiter l'érosion locale du sédiment autour des fondations (affouillement), des dispositifs de protection (enrochements, matelas, géotextiles) sont généralement installés. Les fondations peuvent également comporter différents éléments de fixation au fond, tels que des pieux ou des structures d'assise.

Structures de production : éolien flottant

Au-delà d'environ 50 mètres de profondeur, les structures flottantes sont supposées plus pertinentes sur le plan technico-économique. Cette technologie demeure cependant récente et encore peu déployée à l'échelle commerciale. Les éoliennes flottantes reposent sur une structure immergée assurant la stabilité de l'ensemble, maintenue en position par des lignes d'ancrage fixées au fond marin. On distingue principalement trois grandes familles de structures :

- Structures de type « spar » : cylindre vertical lesté ;
- Structures semi-submersibles : plateformes à colonnes multiples assurant la flottabilité ;
- Plateformes à lignes tendues : stabilisées par des lignes d'ancrage verticales maintenues sous tension.

Les flotteurs sont généralement constitués d'acier ou de béton, protégés contre la corrosion par des peintures couplées à un système de protection cathodique, fonctionnant soit à l'aide d'anodes galvaniques (dites « sacrificielles »), soit par courant imposé. Les lignes d'ancrage sont composées d'acier et/ou de matériaux synthétiques (polyamide, polyester). Les systèmes d'ancrage peuvent prendre différentes formes : ancres gravitaires, ancres enfouies, pieux battus ou encore caissons à suction.

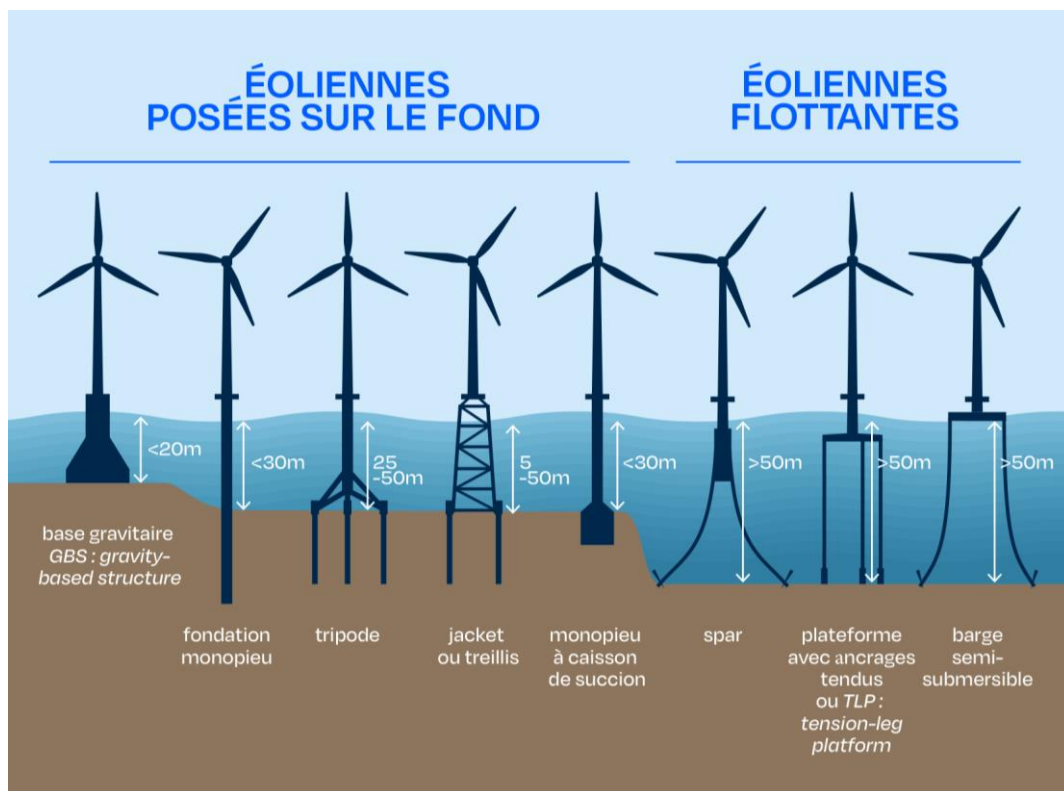


Figure 1. Typologie des structures d'éoliennes en mer : technologies posées et flottantes et leurs dispositifs d'ancrage.

Infrastructures électriques associées : sous-stations et câbles sous-marins

La sous-station électrique offshore (poste électrique en mer) assure la liaison entre les câbles inter-éoliennes et le câble d'export vers la terre. Son composant central est un transformateur. Les câbles inter-éoliennes fonctionnent en courant alternatif. En sortie, la sous-station peut délivrer du courant alternatif haute tension, généralement utilisé pour un parc unique et des distances modérées, ou du courant continu haute tension, permettant le raccordement de plusieurs parcs et le transport sur de plus longues distances. Ces infrastructures constituent elles-mêmes des structures fixes susceptibles de générer des pressions locales (introduction de substrats durs artificiels, champs électromagnétiques, émissions sonores, etc.).

Un parc éolien en mer comprend par ailleurs deux types de câbles : les câbles inter-array reliant les turbines à la sous-station, et les câbles export reliant la sous-station au réseau terrestre. Ces câbles sont composés de conducteurs en cuivre, d'une couche isolante en polymère (plastique technique), d'une armature mécanique en acier et d'une gaine externe protectrice en matériau synthétique résistant (généralement en polyéthylène). Leur installation dépend de la nature du substrat. Dans les sédiments meubles, les câbles export sont généralement ensouillés (enterrés) dans des tranchées d'environ 1 à 1,5 m de profondeur. En substrat dur, ils sont posés sur le fond et protégés par des enrochements ou des matelas en béton.

Infrastructures et aménagements associés à terre

Le déploiement de l'éolien en mer implique également des aménagements à terre, notamment l'extension ou l'adaptation d'infrastructures portuaires pour la construction, l'assemblage et la maintenance, ainsi que le développement de navires spécialisés (installation, intervention, maintenance, etc.). Ces évolutions entraînent une intensification des activités maritimes et portuaires, générant des pressions supplémentaires (trafic, bruit, émissions, artificialisation). Les effets associés aux infrastructures terrestres n'ont cependant pas été traités dans le cadre de cette expertise.

À retenir – Ce que désigne la notion d’« effets des parcs éoliens en mer »

Parler des « effets des parcs éoliens en mer » revient à considérer un ensemble cohérent de composantes — turbines, fondations ou ancrages, sous-stations, câbles — dont les contributions aux pressions environnementales peuvent différer selon la technologie utilisée (posé ou flottant), la profondeur et la nature des fonds, l’architecture du raccordement électrique, ainsi que le contexte écologique et les usages préexistants. L’évaluation des effets nécessite ainsi une approche systémique intégrant l’ensemble de ces composantes et leur interaction dans l’espace et dans le temps.

Les phases de développement des parcs éoliens comme grille de lecture des pressions

L’expertise adopte une lecture par phases de développement, dans la mesure où la nature, l’intensité et la temporalité des pressions sur l’environnement varient fortement entre les différentes étapes de mise en œuvre d’un parc éolien en mer. La durée de vie d’un parc est généralement comprise entre 25 et 35 ans et s’organise autour de quatre grandes étapes : (i) la prospection, (ii) l’installation (ou construction), (iii) l’exploitation et la maintenance, (iv) le démantèlement.

Prospection

La phase de prospection vise à caractériser le site pressenti (bathymétrie, nature des sédiments, propriétés géophysiques du sous-sol). Elle peut mobiliser différentes techniques, telles que les levés acoustiques, les campagnes sismiques ou les forages exploratoires, susceptibles de générer du bruit sous-marin. Les pressions associées sont en général temporaires et spatialement circonscrites, limitées à la durée des campagnes d’étude.

Installation / construction

La phase d’installation correspond à la mise en place des infrastructures (fondations ou ancrages, câbles, sous-stations) et mobilise une activité maritime intense (navires de chantier spécialisés, opérations de levage, battage de pieux, dragage, ensouillage des câbles). Cette phase est associée à des pressions pouvant être élevées en intensité (bruit impulsif lié au battage de pieux, remise en suspension de sédiments, destruction directe d’habitats benthiques au droit des emprises, augmentation temporaire du trafic maritime).

Exploitation et maintenance

La phase d’exploitation constitue la période la plus longue du développement d’un parc. Elle est caractérisée par la rotation des pales et la production d’électricité, le fonctionnement continu des équipements électriques, ainsi que par des opérations régulières de maintenance, dont la fréquence varie selon les besoins techniques et les caractéristiques du parc. Si certaines interventions sont ponctuelles à l’échelle de chaque turbine, l’exploitation peut également mobiliser une présence navale prolongée sur site, avec des navires dédiés stationnés de manière quasi continue sur des périodes de plusieurs jours ou semaines. Les pressions associées sont généralement moins intenses que lors de la construction, mais plus persistantes dans le temps. Elles incluent notamment la rotation des pales, un bruit sous-marin chronique, des modifications locales des écoulements hydrodynamiques, la présence de champs électromagnétiques liés aux câbles, des émissions de substances chimiques, ainsi qu’une fréquentation régulière par des navires de maintenance, de surveillance et, dans certains cas, de tourisme. Cette phase soulève des questions spécifiques relatives aux effets à long terme, aux dynamiques de colonisation biologique et aux interactions avec les usages maritimes.

Démantèlement

La réglementation et les contrats d’exploitation prévoient en principe la remise en état du site à l’issue de la période d’exploitation. Toutefois, les retours d’expérience demeurent limités : plus de trente ans après la mise en service du parc danois de Vindeby, seuls quelques parcs ont été effectivement démantelés, ce qui conduit à un déficit de données scientifiques sur cette phase. Le démantèlement combine des pressions similaires à celles observées lors

de la construction (bruit, activité navale, perturbation du fond) et une question écologique spécifique portant sur les conséquences de l'enlèvement d'habitats artificiels et des communautés biologiques qui s'y sont développées. La question du mode de gestion des structures en fin d'exploitation — retrait total ou retrait partiel — fait encore l'objet de discussions scientifiques et réglementaires : cette phase soulève en effet la question de savoir s'il convient de viser une restauration complète du site ou de préserver certains éléments devenus, au fil du temps, des habitats pour la faune marine (Lemasson *et al.*, 2023).

Conséquences pour l'évaluation des effets

Les phases de construction et de démantèlement génèrent souvent des pressions intenses mais de courte durée, ce qui pose principalement des questions d'effet aigu et de seuils de tolérance biologique. La phase d'exploitation, en revanche, induit des pressions moins aiguës mais persistantes, susceptibles de produire des effets à plus long terme ainsi qu'un risque accru de cumul d'effets. Cette distinction modifie la nature des incertitudes scientifiques, les indicateurs pertinents à mobiliser et les besoins de suivi environnemental, qui doivent être adaptés à chaque étape du cycle de développement.

À retenir – Choix d'une entrée par pression

L'expertise retient une analyse par pressions, car elle permet de comparer des résultats issus de technologies, de contextes environnementaux et de configurations d'implantation variés. Ce choix vise également à mieux identifier, dans une perspective d'appui à l'action publique, les leviers d'atténuation mobilisables selon les différentes pressions générées par les parcs éoliens en mer, notamment pour éclairer la conception des mesures d'évitement, de réduction ou de suivi environnemental.

Il convient néanmoins de souligner que les effets observés ne relèvent pas toujours d'une relation simple et univoque. Une même pression peut conduire à des effets similaires via des mécanismes différents : par exemple, le battage de pieux et le dragage peuvent tous deux modifier les communautés benthiques, notamment par la remise en suspension des sédiments et l'altération du substrat.

À l'inverse, plusieurs pressions peuvent agir simultanément sur un même récepteur : un habitat benthique peut, par exemple, être exposé à la fois à une modification de la turbidité, à une altération physique du substrat, à des modifications hydrodynamiques, à des ondes et rayonnements, ainsi qu'à des dépôts sédimentaires.

Enfin, un même récepteur peut être exposé à différentes pressions au cours de son cycle de vie ; certaines espèces peuvent être sensibles au bruit en phase larvaire, aux modifications d'habitat en phase juvénile et aux obstacles physiques à l'âge adulte, rendant insuffisante une lecture strictement mono-pression. Dans tous les cas, le degré d'effet dépend notamment de la durée et de la fréquence d'exposition, de l'intensité de la pression, de son extension spatiale et de la sensibilité intrinsèque du récepteur.

Les pressions générées par les éoliennes en mer

Définition et cadre d'analyse

Une pression est ici définie comme l'ensemble des mécanismes par lesquels une activité humaine modifie, dans l'espace et dans le temps, les caractéristiques physico-chimiques du milieu marin au-delà de leur variabilité naturelle. Ces pressions peuvent être de nature physique, chimique ou biologique. Lorsqu'elles dépassent les fluctuations naturelles d'un paramètre environnemental, elles peuvent se traduire par des modifications observables de l'état écologique à différents niveaux d'organisation du vivant, de l'individu à l'écosystème. Une pression peut ainsi engendrer un effet, entendu comme une modification mesurable de l'état d'un habitat ou d'un groupe biologique.

Par ailleurs, les pressions associées à l'éolien en mer peuvent s'ajouter à celles d'autres activités humaines (transport maritime, pêche, extraction, etc.) et interagir avec les effets du changement climatique, produisant des effets cumulés, synergiques ou antagonistes.

On distingue la pression de l'impact, ce dernier renvoyant à l'appréciation des conséquences écologiques potentielles des effets observés au regard d'un cadre d'analyse donné, qu'il soit scientifique, réglementaire ou lié

à des objectifs de gestion. Dans la mesure où cette qualification dépend du contexte considéré et des référentiels mobilisés, l'expertise retient ici une approche descriptive fondée sur la notion d'effet (cf. encadré).

À retenir – Qualification des effets et choix terminologiques « effet / impact »

Dans le cadre de l'expertise, il a été choisi de ne pas qualifier les effets observés de « positifs » ou de « négatifs ». Un même effet peut en effet être interprété différemment selon le contexte écologique, le niveau d'organisation biologique considéré ou les parties prenantes concernées. Par exemple, une augmentation de l'abondance de poissons liée à une pression donnée peut être favorable pour certaines populations, tout en ayant, à l'échelle de l'écosystème, des conséquences défavorables en modifiant les interactions trophiques, les équilibres entre espèces ou la composition des communautés. Attribuer une qualification normative à un effet revient ainsi à privilégier un point de vue particulier.

L'approche retenue consiste donc à qualifier les résultats de manière rigoureuse et non normative, en distinguant uniquement l'existence d'un effet, son absence ou un effet mixte (selon les cas, existence ou absence d'effet). Cette démarche vise à limiter la subjectivité, à refléter fidèlement les connaissances disponibles et à rendre explicites les situations d'incertitude.

Par ailleurs, afin de garantir la cohérence terminologique et d'éviter toute interprétation implicite, le choix a été fait d'utiliser systématiquement le terme « effet ». Plus descriptif et moins connoté que celui d'« impact », il permet de rendre compte des résultats sans préjuger de leur portée. Dans la plupart des cas, le sens écologique d'un effet est d'ailleurs explicitement porté par le contexte scientifique, sans qu'il soit nécessaire de le qualifier comme « positif » ou « négatif ».

Le cadrage méthodologique de l'expertise repose sur plusieurs principes analytiques : une même pression peut conduire à des effets similaires via des mécanismes différents, plusieurs pressions peuvent agir simultanément sur un même récepteur, et un même récepteur peut être exposé à différentes pressions au cours de son cycle de vie. Le degré d'effet dépend enfin de paramètres clés, notamment la durée et la fréquence d'exposition, l'intensité de la pression, son extension spatiale et la sensibilité intrinsèque du récepteur. Ces éléments justifient l'importance accordée aux conditions d'exposition et aux caractéristiques des récepteurs dans l'interprétation des résultats.

Typologie des pressions considérées

Les pressions sont décrites selon une typologie structurée en grandes catégories, tout en reconnaissant l'existence d'autres classifications possibles dans la littérature scientifique.

Pressions physiques

Les pressions physiques regroupent l'ensemble des modifications mécaniques ou énergétiques introduites dans le milieu marin. Les éoliennes constituent des structures tridimensionnelles introduites dans le paysage marin : elles peuvent entraîner des collisions (notamment pour l'avifaune et les chiroptères), induire des comportements d'attraction ou d'évitement, produire des effets de barrière ou de fragmentation de l'espace et modifier l'usage spatial du milieu. Certaines infrastructures flottantes peuvent également générer des risques d'enchevêtrement pour les mammifères marins, notamment via les câbles dynamiques d'ancrage. Les fondations et ancrages perturbent localement les écoulements marins, générant des tourbillons et un sillage turbulent, des phénomènes d'affouillement (érosion localisée des sédiments au pied des structures) et des panaches turbides pouvant s'étendre sur plusieurs kilomètres. Ces modifications hydrodynamiques peuvent influencer la stratification de la colonne d'eau (organisation verticale des masses d'eau selon leurs propriétés physiques, notamment la température et la salinité), la dispersion des nutriments ou des particules biologiques ainsi que la dynamique sédimentaire.

Les parcs éoliens génèrent du bruit, de différentes natures, à toutes les phases de leur développement : prospection sismique (impulsions acoustiques puissantes), battage de pieux lors de la construction pour certains parcs (sources sonores parmi les plus intenses en milieu marin), bruit chronique en phase d'exploitation et bruit lié aux opérations de maintenance et au trafic maritime. Le bruit constitue une pression majeure pour de nombreuses espèces marines, en particulier celles qui utilisent les signaux acoustiques pour la communication, l'orientation ou l'écholocalisation.

Les parcs éoliens introduisent également d'autres formes d'énergie : des champs électromagnétiques (CEM) liés aux câbles électriques — le champ magnétique ne pouvant être confiné —, de la lumière artificielle (signalisation maritime et aérienne) contribuant à la pollution lumineuse nocturne, ainsi que des émissions de chaleur.

Pressions chimiques

Les pressions chimiques peuvent résulter de la dissolution des systèmes anticorrosion (anodes galvaniques, peintures), de fuites d'huiles ou de lubrifiants, de l'émission de microplastiques ou de fragments de matériaux et des rejets liés à l'activité maritime. Ces émissions peuvent affecter la qualité des sédiments et de la colonne d'eau.

Pressions biologiques

Au-delà des pressions directes, l'introduction d'un parc éolien peut induire des transformations écologiques plus larges. Les travaux et les changements hydrodynamiques peuvent entraîner des destructions ou altérations d'habitats, des changements granulométriques, des redépôts sédimentaires et des modifications biogéochimiques (oxygenation, accumulation de matière organique), susceptibles d'affecter les fonctions écologiques des communautés benthiques.

Les structures peuvent modifier la stratification, le mélange vertical et les flux de nutriments, influençant ainsi la production primaire (production de matière organique par les organismes photosynthétiques à la base des réseaux trophiques) et la dynamique planctonique, et contribuant à des modifications du compartiment pélagique.

L'installation de surfaces dures dans des zones dominées par des substrats meubles favorise la colonisation par des espèces inféodées aux substrats durs. Cet « effet récif » artificiel peut accroître localement la biodiversité, modifier les réseaux trophiques (relations alimentaires entre espèces), favoriser l'installation d'espèces non indigènes et transformer durablement le fonctionnement de l'écosystème.

À large échelle spatiale, l'agrégation de plusieurs parcs peut modifier les mosaïques d'habitats, la connectivité écologique et la fragmentation du paysage marin. Les parcs éoliens peuvent également agir comme des « pas japonais » favorisant la dispersion d'espèces non indigènes, notamment via les structures immergées, les ports d'assemblage et les navires de maintenance. Enfin, l'implantation de parcs éoliens peut modifier certaines activités humaines exerçant elles-mêmes des pressions sur la biodiversité marine, notamment lorsque certains usages, comme les activités de pêche, sont réduits ou interdits à l'intérieur des parcs, générant ainsi des effets indirects sur la biodiversité.

Les pressions décrites ci-dessus ont été regroupées en dix catégories couvrant les principales voies d'interaction entre les parcs éoliens en mer et la biodiversité marine. La figure 2 en présente une représentation synthétique.

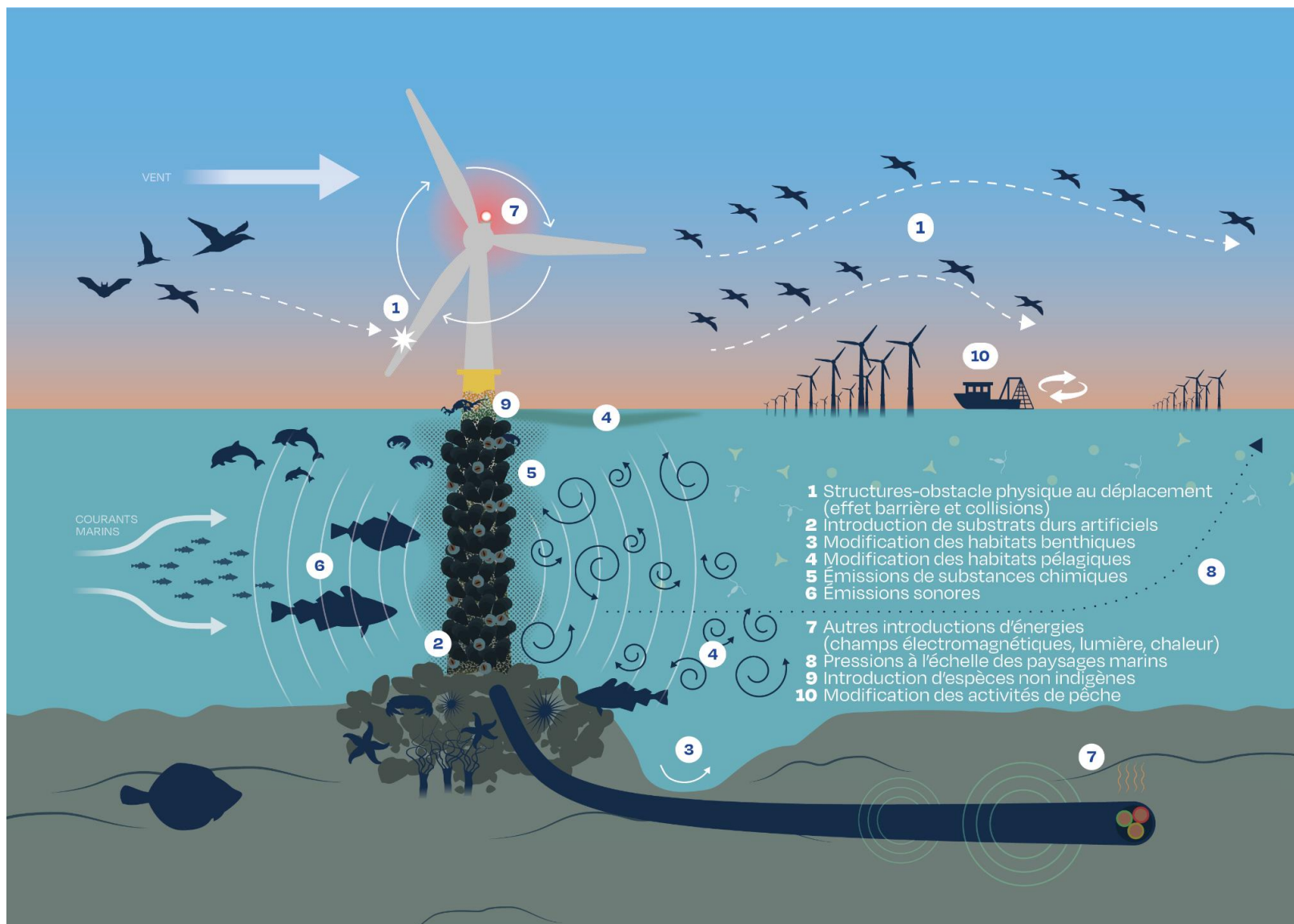


Figure 2. Les 10 pressions analysées dans le cadre de l'expertise.

Biodiversité considérée : groupes biologiques et niveaux d'organisation

Une définition intégrative de la biodiversité

L'article 2 de la Convention sur la diversité biologique (CBD, 1992) définit la biodiversité comme « *la variabilité des organismes vivants [...] et les complexes écologiques dont ils font partie ; cela comprend la diversité au sein des espèces, entre les espèces ainsi que celle des écosystèmes* ». Cette définition implique une compréhension large et intégrée du vivant, qui dépasse le seul recensement des espèces présentes.

La biodiversité s'exprime à plusieurs niveaux d'organisation — du gène à l'écosystème, voire au paysage et au socio-écosystème — et selon différentes dimensions complémentaires : composition (quelles entités sont présentes), structure (comment elles sont organisées) et fonction (quels processus assurent le fonctionnement du système). Ainsi, la richesse spécifique ne constitue qu'une composante partielle de la biodiversité. La diversité génétique, la diversité phylogénétique (degré de parenté évolutive entre espèces) et la diversité fonctionnelle renseignent, par exemple, sur le potentiel adaptatif, l'histoire évolutive et les rôles écologiques des organismes. Ces différentes facettes ne sont pas nécessairement congruentes : une augmentation locale du nombre d'espèces peut coexister avec une simplification fonctionnelle ou une homogénéisation génétique. L'interprétation des effets doit donc être prudente et contextualisée.

Un état des connaissances encore incomplet

La biodiversité marine demeure imparfaitement connue. Même dans des espaces relativement bien étudiés comme les écosystèmes côtiers de France hexagonale, une part significative de la diversité spécifique, génétique et fonctionnelle demeure insuffisamment documentée. Cette incomplétude structurelle de la connaissance constitue un élément important du contexte de l'expertise. Elle signifie que certains effets peuvent ne pas être détectés, non parce qu'ils n'existent pas, mais parce que les données disponibles sont insuffisantes, les suivis encore trop limités ou certains compartiments et processus biologiques encore peu étudiés. L'absence de preuve d'un effet ne peut donc être interprétée comme une preuve d'absence d'effet, ce qui justifie une attention particulière portée aux incertitudes et aux lacunes identifiées dans la littérature.

Les Variables Essentielles de la Biodiversité (EBV) comme cadre analytique

Pour décrire l'état et la dynamique de la biodiversité, plusieurs indicateurs issus de paramètres mesurables sont nécessaires (Delavaud *et al.*, 2021). Aucun indicateur unique ne permet, à lui seul, de rendre compte de la complexité des niveaux d'organisation et des dimensions de la biodiversité. C'est dans cette perspective que le réseau international de recherche « *Group on Earth Observations Biodiversity Observation Network* » (GEO BON), qui rassemble des scientifiques travaillant sur l'observation et le suivi de la biodiversité à l'échelle mondiale, a proposé un ensemble minimal de variables clés : les Variables Essentielles de la Biodiversité (Essential Biodiversity Variables – EBV).

Les EBV constituent un cadre conceptuel visant à relier des observations mesurables aux principales composantes de la biodiversité. Elles sont structurées en six grandes classes (Pereira *et al.*, 2013) : (1) composition génétique, (2) populations des espèces, (3) traits de vie des organismes, (4) composition des communautés, (5) structure des écosystèmes, (6) fonction des écosystèmes.

Les EBV s'inspirent du cadre des Variables Essentielles du Climat (ECV, Essential Climate Variables) développé par le « *Global Climate Observing System* » (GCOS), programme international de coordination de l'observation climatique mis en place pour appuyer la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC). De manière analogue, les EBV visent à fournir un socle commun d'indicateurs permettant de soutenir le suivi, l'évaluation et les politiques publiques en matière de biodiversité. Les EBV sont aujourd'hui mobilisées à l'échelle internationale, notamment par la Plateforme Intergouvernementale Scientifique et Politique sur la Biodiversité et les Services Écosystémiques (IPBES).

Dans la présente expertise, les EBV ont été retenues comme cadre d'analyse des réponses de la biodiversité aux pressions associées aux parcs éoliens en mer. Ce cadre facilite l'articulation entre pressions identifiées, indicateurs mobilisables et interprétation écologique des résultats, en assurant une cohérence entre niveaux d'organisation biologique et types de réponses observables. Les EBV ayant été initialement développées et appliquées principalement en contexte terrestre, certains ajustements ont été réalisés afin d'adapter les définitions au contexte des écosystèmes marins.

Le Tableau 1 présente les Variables Essentielles de la Biodiversité (EBV) utilisées dans cette expertise, en précisant, pour chaque classe, les variables retenues et leur définition opérationnelle dans le contexte marin.

Classe de Variable	Variable essentielle
Composition génétique	Diversité génétique intraspécifique
	Différentiation génétique des populations
	Taille effective de population
	Consanguinité
Populations d'espèces	Migration
	Distribution et abondance
	Structure démographique
Traits des organismes	Mortalité
	Morphologie
	Physiologie
	Phénologie
	Régime alimentaire
	Comportement
	Caractéristique de nage
	Reproduction
Composition de la communauté	Distribution des abondances
	Diversité taxonomique et phylogénétique
	Diversité des traits fonctionnels des organismes
	Diversité des interactions entre organismes
Fonctionnement de l'écosystème	Productivité
	Fonctions biotiques de l'écosystème
	Fonctions biogéochimiques et physiques de l'écosystème
Structure de l'écosystème	Types d'écosystème
	Profil vertical de l'écosystème
Système socio-écologique	Interactions socio-écologiques

Tableau 1. Variables essentielles de biodiversité (EBV) utilisées dans cette expertise.

À retenir – Choix du cadre des EBV dans l'expertise

Les EBV ont été retenues pour cette expertise en raison de leur capacité à décrire de manière structurée l'état et la dynamique de la biodiversité dans ses différentes composantes (génétique, spécifique, communautaire, écosystémique) et dimensions (composition, structure, fonction), y compris en réponse aux activités humaines.

Leur usage croissant en France, en Europe et à l'international pour accompagner les politiques publiques garantit également la compatibilité de l'expertise avec les cadres de suivi et d'évaluation existants. Le recours aux EBV permet ainsi d'inscrire l'analyse des effets des parcs éoliens en mer dans un référentiel partagé, facilitant la comparabilité des résultats et leur mobilisation pour l'action publique.

Les groupes biologiques considérés

Afin d'articuler pressions et biodiversité de manière opérationnelle, l'expertise décrit les principaux récepteurs biologiques susceptibles d'être exposés aux pressions identifiées. Dans le cadre de l'évaluation des effets des parcs éoliens en mer, la biodiversité est abordée à travers la notion de récepteurs biologiques, c'est-à-dire des

composantes biologiques susceptibles d'être exposées aux pressions identifiées au cours des phases de développement des installations.

Les récepteurs benthiques regroupent les habitats du fond marin, les producteurs primaires benthiques tels que les macro-algues et les herbiers, ainsi que les communautés de macro-invertébrés et de microorganismes qui y sont associés. Ces composantes sont particulièrement exposées aux pressions liées aux travaux d'installation et de démantèlement, notamment l'altération du substrat, la remise en suspension des sédiments et la destruction locale d'habitats. Elles peuvent également être affectées, durant la phase d'exploitation, par les modifications hydrodynamiques locales et l'introduction de surfaces artificielles.

Les récepteurs de la colonne d'eau (ensemble des masses d'eau comprises entre la surface et le fond marin) comprennent les compartiments pélagiques, depuis le phytoplancton et le zooplancton jusqu'aux poissons pélagiques et aux mammifères marins. Ils sont exposés aux modifications de la stratification et du mélange vertical, de la turbidité ou de la disponibilité en nutriments, ainsi qu'au bruit sous-marin, à la lumière artificielle et aux champs électromagnétiques. Les réponses observables peuvent concerner la productivité primaire, la distribution spatiale des populations, la structure des réseaux trophiques ou encore certains traits physiologiques et comportementaux.

Les récepteurs biologiques aériens — oiseaux, chiroptères — sont particulièrement sensibles aux obstacles physiques et aux modifications d'usage de l'espace.

Pour l'ensemble de ces récepteurs biologiques, les effets peuvent s'exprimer à l'échelle individuelle, par des changements physiologiques, des réactions d'évitement ou des modifications comportementales, mais également à l'échelle des populations, via des changements d'abondance ou de succès reproducteur, voire à des échelles spatiales plus larges, de l'écosystème au paysage marin (ensemble d'écosystèmes reliés dans l'espace par les déplacements d'organismes et les flux écologiques).

Groupes biologiques et cadre opérationnel pour l'évaluation

Pour assurer la cohérence de la revue systématique de littérature et permettre une analyse homogène des publications du corpus, l'expertise s'appuie sur des « groupes biologiques ». Ces groupes ne coïncident pas toujours avec des unités taxonomiques strictes, mais constituent des regroupements opérationnels d'organismes partageant des mécanismes d'exposition et des types de réponses similaires face aux pressions associées aux parcs éoliens en mer. Ils incluent à la fois des groupes taxonomiques bien définis (par exemple oiseaux ou céphalopodes), des regroupements fonctionnels ou écologiques (mammifères marins, macro-invertébrés benthiques, organismes photosynthétiques), ainsi que des catégories plus larges lorsque les études portent sur des habitats, des communautés ou des écosystèmes sans distinction fine entre récepteurs biologiques.

Ces regroupements constituent des simplifications nécessaires pour analyser un corpus scientifique vaste et hétérogène. Ils permettent d'identifier des tendances générales tout en reconnaissant la diversité interne et les spécificités écologiques propres à chaque taxon ou fonction. L'objectif n'est pas d'établir un inventaire exhaustif de la biodiversité marine, mais de disposer d'un cadre conceptuel explicite reliant pressions, récepteurs et niveaux d'organisation, afin d'identifier les mécanismes d'exposition dominants, de qualifier les types de réponses biologiques attendues et d'éclairer les besoins en indicateurs et en suivi.

Le Tableau 2 présente les « groupes biologiques » considérés dans le cadre de cette expertise. Il ne s'agit pas de groupes taxonomiques au sens strict, mais d'entités pour lesquelles les effets des parcs éoliens en mer sont susceptibles de présenter des points communs, en lien avec leurs caractéristiques biologiques. En articulant la typologie des pressions avec les EBV et ces groupes biologiques, l'expertise vise à produire une lecture intégrée des effets potentiels des parcs éoliens en mer.

Groupe biologique	Définition
Oiseaux	Oiseaux de mer (alcidés, goélands, sternes, etc.), oiseaux migrateurs terrestres (passereaux, rapaces, etc.).
Chiroptères	Chauve-souris, dont certaines espèces utilisent l'écholocalisation (émission et réception d'ondes sonores permettant de se repérer dans l'espace et de localiser des proies).
Céphalopodes	Calmars, pieuvres, seiches, nautes. Ils perçoivent les sons grâce à leurs statocystes (organes sensoriels impliqués dans l'équilibre et la perception des vibrations).
Poissons	Groupe très diversifié. Quelques exemples : maquereaux, anguilles, hippocampes, soles, petites et grandes roussettes, raies bouclées, myxines, lamproies.
Mammifères marins	Cétacés (odontocètes et mysticètes), pinnipèdes (morses, otaries et phoques) et siréniens. Les loutres marines et l'ours polaire peuvent également être inclus dans certaines classifications.
Reptiles	Tortues, lézards, serpents, crocodiles.
Macro-invertébrés benthiques	Divers organismes macroscopiques vivant sur ou dans les substrats durs ou meubles du fond marin : arthropodes (crabes, crevettes), mollusques (coquilles Saint-Jacques, palourdes, etc.), annélides, échinodermes (étoiles de mer, oursins, etc.), cnidaires (anémones de mer, coraux, etc.), porifères (éponges, etc.).
Macro-invertébrés pélagiques	Divers organismes présents dans la colonne d'eau : zooplancton, copépodes, crustacés (krill), cnidaires (méduses, siphonophores, etc.), cténophores (organismes gélatineux planctoniques).
Plantes marines, phytoplancton, cyanobactéries et algues	Macro- et micro-organismes photosynthétiques (dépendant de la lumière) : phytoplancton, cyanobactéries, algues rouges, laminaires, sargasses, phanérogames.
Autres micro-organismes marins (sauf phytoplancton et cyanobactéries)	Microorganismes benthiques (par exemple biofilms constitués de cellules microbiennes adhérant entre elles et aux surfaces dures) ou pélagiques (microorganismes en suspension dans la colonne d'eau, hors phytoplancton).
Catégories plus larges que celles définies ci-dessus	Ensembles écologiques intégrateurs : écosystèmes, communautés, réseaux trophiques, habitats sans séparation entre les groupes définis ci-dessus. Exemple : les communautés benthiques incluent les plantes marines, les macro-invertébrés benthiques et certains poissons.

Tableau 2. Groupes biologiques considérés dans cette expertise.

À retenir – Nouveautés et apports majeurs de cette expertise

Cette ESCo propose une lecture intégrée et transversale des effets des parcs éoliens en mer sur la biodiversité marine, en considérant simultanément l'ensemble des pressions identifiées, les différentes phases de développement des parcs ainsi que les principales composantes de la biodiversité. Elle dépasse ainsi les approches plus fragmentées, souvent centrées sur une seule pression, un groupe biologique ou une phase spécifique du développement des parcs.

L'expertise repose sur une revue systématique de la littérature scientifique internationale conduite selon une méthode rigoureuse, exhaustive, transparente et reproductible, conforme aux standards du « *Collaboration for Environmental Evidence* » (CEE). Le corpus mobilisé est le plus étendu analysé à ce jour sur cette thématique. L'analyse s'appuie sur un codage structuré des publications, intégrant à la fois les caractéristiques des études (localisation, durée, type de parc, phase de développement, etc.) et les effets observés selon les combinaisons « pression × groupe biologique ».

Le recours aux Variables Essentielles de la Biodiversité (EBV) comme cadre d'analyse permet d'intégrer plusieurs niveaux d'organisation du vivant, depuis les réponses individuelles jusqu'aux dynamiques des populations, des communautés et des écosystèmes. Cette approche contribue à dépasser une lecture centrée uniquement sur les espèces ou les effets locaux, en intégrant également des dimensions fonctionnelles et écosystémiques.

Enfin, l'expertise retient une qualification descriptive et non normative des résultats — effet, absence d'effet ou effet mixte — afin de limiter les biais d'interprétation et de rendre visibles les situations d'incertitude, de variabilité contextuelle ou de divergence scientifique.

Par l'ampleur du corpus analysé, le caractère particulièrement structuré, rigoureux et reproductible de la méthode mobilisée, la finesse du codage et des analyses réalisées, ainsi que l'intégration transversale des différentes pressions, phases de développement et composantes de la biodiversité, cette expertise constitue à ce jour la synthèse scientifique la plus complète consacrée aux effets de l'éolien en mer sur la biodiversité marine.

PARTIE 2

**Cadre méthodologique de
la revue systématique
et résultats de
la cartographie de
la littérature**

1. Cadre méthodologique : la revue systématique de la littérature

La présente expertise s'appuie sur une revue systématique de la littérature (RSL) conduite selon les protocoles et standards du *Collaboration for Environmental Evidence (CEE)*, un réseau international de référence pour les revues systématiques et les synthèses structurées de données probantes en environnement.

Le choix de cette démarche est double : produire une synthèse des connaissances scientifiques à la fois rigoureuse, transparente et reproductible, et rendre explicites les incertitudes, controverses et lacunes qui structurent encore le champ de recherche.

L'ensemble de la méthode, détaillée dans le rapport d'expertise, a été conçu pour garantir traçabilité, cohérence et contrôle des biais, à travers une succession d'étapes clairement définies et assorties de dispositifs de vérification interne.

Gouvernance scientifique et organisation du travail

L'expertise a mobilisé 25 expert·es issus de disciplines complémentaires (écologie marine, halieutique, acoustique, entre autres). Afin d'articuler coordination méthodologique et expertise thématique, l'organisation du collectif s'est structurée autour de trois niveaux complémentaires : une équipe pilote chargée du pilotage méthodologique et de la cohérence scientifique, un groupe resserré de 10 expert·es impliqué·es dans les étapes critiques de sélection et de codage général des publications afin de limiter la variabilité entre évaluateurs, et des groupes de travail thématiques réunissant l'ensemble du collectif pour le codage spécifique et l'analyse détaillée de chaque pression.

Certaines phases clés du processus ont intégré des tests de convergence entre évaluateurs afin de vérifier la cohérence des informations extraites et réduire les biais d'interprétation. Des relectures croisées, des vérifications aléatoires ainsi qu'un audit approfondi sur un sous-ensemble de publications ont également été réalisés afin de renforcer collectivement la robustesse de la démarche.

Définition du cadre analytique (PECOc)

La question de saisine de l'ESCO a été formalisée selon le cadre PECOc (Population, Exposition, Comparateur, Outcome (Résultat), contexte), couramment mobilisé en synthèse systématique.

Le cadrage retenu repose sur les éléments suivants :

- Population : systèmes naturels marins et socio-écosystèmes marins et côtiers ;
- Exposition : parcs éoliens en mer et co-activités associées ;
- Comparateur : non requis dans le cadre de cette synthèse ;
- Outcome (Résultat) : effets observés sur la biodiversité ;
- contexte : littérature scientifique évaluée par les pairs, publiée en anglais ou en français et accessible en texte intégral.

Ce cadrage a structuré à la fois l'élaboration de la stratégie bibliographique et la définition des critères d'éligibilité appliqués tout au long du processus de sélection des publications. Ces critères permettent de déterminer quels articles répondent à la question de saisine et peuvent être inclus dans le corpus analysé, et quels articles doivent en être exclus.

Recherche bibliographique

À partir du cadre PECOc, une équation de recherche bibliographique comprenant 747 mots-clés a été construite afin d'identifier les publications scientifiques pertinentes pour cette expertise. La requête a été appliquée le 6 mars 2024 dans les bases de données internationales *Web of Science* et *Scopus*, permettant d'identifier 4 493 références.

Un complément de 74 publications, issues de la base spécialisée « *Offshore Wind Farm Environmental Evidence Database* », a été intégré le 12 avril 2024 afin de compléter le corpus initial sur certains sujets plus périphériques au regard du périmètre de la saisine (par exemple les matériaux et structures des éoliennes en mer, ou certaines dimensions de perception sociale des parcs), portant l'ensemble à 4 567 références.

Afin de vérifier la pertinence de l'équation de recherche, une « liste test » de 185 publications a été constituée à partir d'articles sélectionnés par les expert·es et complétée par une revue systématique antérieure (Galparsoro *et al.*, 2022). Cette étape a permis d'évaluer la capacité de la requête à retrouver des références jugées pertinentes au regard du cadre PECOc et des critères d'éligibilité définis. Après plusieurs itérations d'ajustement, la requête a permis de retrouver 92,9 % des publications de cette liste test. Les rares références non capturées correspondaient principalement à des publications ne mentionnant pas explicitement l'éolien en mer dans leurs métadonnées (titre, résumé ou mots-clés). Ce niveau de performance est conforme aux standards internationaux des revues systématiques.

À retenir – Bornes temporelles de la revue systématique

La littérature scientifique prise en compte dans cette revue systématique correspond aux publications identifiées lors de la recherche bibliographique arrêtée au 6 mars 2024, complétée le 12 avril 2024 par l'intégration ciblée d'articles issus d'une base spécialisée. Les publications postérieures à cette période n'ont donc pas été intégrées au corpus analysé dans le cadre de la revue systématique de la littérature.

Sélection des articles

Le corpus initial de 4 567 références a été soumis à un processus de sélection progressif fondé sur des critères d'éligibilité prédéfinis par le collectif d'expert·es à partir du cadre PECOc (les critères détaillés ainsi que l'ensemble des étapes de sélection sont présentés en détail dans le rapport d'expertise).

Une première sélection sur titres et résumés a été réalisée par un groupe resserré de 10 expert·es. Une phase test préalable a permis de vérifier la cohérence des décisions entre évaluateurs et d'affiner les critères d'inclusion et d'exclusion des publications. À l'issue de cette étape, 1 267 publications ont été retenues.

Parmi elles, 1 113 textes intégraux (PDF) ont pu être obtenus ; 154 publications ont donc été exclues faute d'accès au texte complet.

Les 1 113 publications ont ensuite été examinées sur texte intégral par ce même groupe resserré afin de confirmer leur éligibilité et de les répartir par grandes thématiques, en vue de l'analyse par pression et du traitement des thématiques transversales de l'expertise. Au total, 813 publications ont été incluses : 627 ont été affectées aux sections thématiques consacrées aux pressions, et 190 aux thématiques transversales ou identifiées comme articles de synthèse, avec des recouvrements possibles entre ces deux ensembles.

À partir de cette étape, le corpus a été structuré en chapitres thématiques correspondant aux différentes pressions générées par les éoliennes en mer, chaque chapitre faisant l'objet d'un codage spécifique, tandis qu'un codage général a été appliqué à l'ensemble des publications du corpus afin d'alimenter la cartographie de la littérature (voir rapport d'expertise et sections suivantes).

Codage général et cartographie du corpus

Le codage général constitue une étape centrale de la démarche. Il vise à extraire, de manière standardisée, les informations clés de chaque publication afin de produire une cartographie structurée du corpus scientifique issu de la revue systématique.

Un outil de codage partagé (un tableur structuré commun) a été utilisé. Les champs renseignés pour chaque publication dans le cadre du codage général incluaient notamment :

- Les métadonnées de la publication (année de publication, auteurs et autrices, revue scientifique, etc.) ;
- Le ou les récepteurs biologiques étudiés ;
- Le ou les types de pression analysés ;
- Les résultats observés pour chaque récepteur biologique exposé à la pression analysée (effet ou absence d'effet), notamment au regard du cadre des Variables Essentielles de la Biodiversité (EBV) ;
- Les caractéristiques des parcs éoliens étudiés (type d'éolienne, localisation, phase de développement, etc.) ;
- Les variables de contexte des études (zone géographique, type d'étude, durée, méthode, etc.).

Le codage général a été réalisé par les 25 expert·es du collectif, qui ont procédé à une dernière étape de sélection parmi les 627 publications affectées aux chapitres thématiques consacrés aux pressions, afin de retenir, sur la base de leur champ d'expertise, les articles les plus pertinents pour l'analyse et comportant des données primaires (c'est-à-dire des résultats issus directement d'observations, de mesures ou d'expérimentations originales ou de simulations numériques), nécessaires à un codage direct des résultats.

Les exclusions complémentaires concernaient principalement des publications ne comportant pas de données primaires (revues, articles de synthèse ou articles d'opinion), des analyses de cycle de vie (ACV) appliquées aux éoliennes en mer, ainsi que des études socio-écologiques sans mesure directe d'effet sur la biodiversité. Ces publications ont toutefois pu être mobilisées pour éclairer certaines questions transversales relevant du champ de l'expertise ou pour contextualiser certains résultats de l'analyse.

Ce travail a conduit au codage général effectif de 411 articles, correspondant, après décomposition des combinaisons « pression × groupe biologique », à 518 études distinctes.

À retenir – Distinction entre article et étude dans la revue systématique

Une distinction méthodologique importante est opérée entre article et étude, afin de refléter fidèlement la structure réelle des connaissances scientifiques disponibles. Un article correspond à une publication scientifique unique. Toutefois, un même article peut documenter plusieurs situations analytiques distinctes : par exemple, étudier plusieurs pressions (bruit, modification d'habitat, champs électromagnétiques), plusieurs groupes biologiques (poissons, invertébrés benthiques, oiseaux), ou plusieurs phases de développement d'un parc.

Afin d'éviter toute simplification excessive et de rendre compte de la diversité des résultats, chaque article a donc été décomposé en unités d'analyse autonomes, correspondant aux combinaisons « pression × groupe biologique » effectivement étudiées. Ces unités constituent les études au sens de la revue systématique.

Cette distinction permet :

- D'analyser plus finement les mécanismes d'exposition et les réponses biologiques ;
- D'éviter qu'un article traitant de plusieurs pressions ou groupes biologiques ne soit comptabilisé comme une seule observation ;
- De produire une cartographie plus précise des connaissances disponibles.

Codage spécifique par pression

Au-delà du codage général, chaque pression a fait l'objet d'un codage thématique spécifique, adapté à la nature de la pression étudiée (émissions sonores, introduction de substrats durs artificiels, modification des habitats benthiques, etc.). Ces codages spécifiques permettent d'approfondir l'analyse des mécanismes d'exposition, des réponses biologiques observées et des incertitudes associées. Les modalités précises de mise en œuvre sont détaillées dans les chapitres thématiques du rapport d'expertise scientifique consacrés à chaque pression.

L'expertise repose ainsi sur un cadre méthodologique conforme aux standards internationaux de synthèse systématique des données probantes, ainsi que sur un corpus transparent, tracé et évalué collectivement.

2. Résultats généraux de la cartographie de la littérature

Taille et dynamique du corpus

Au total, 411 articles scientifiques publiés dans des revues à comité de lecture, correspondant à 518 études (définies comme des combinaisons « pression × groupe biologique »), ont été retenus pour le codage dans le cadre de cette revue systématique. Ce corpus est 3,1 fois supérieur au plus grand corpus publié à ce jour dans la base « *Offshore Wind Farm Environmental Evidence Database* » (Watson et al., 2024).

La dynamique des publications met en évidence une progression régulière depuis 1998, avec un délai moyen observé entre la fin d'une étude et sa publication de 3,3 ans (max = 20 ans). La durée moyenne des études est de 5,6 ans (min = 1 mois, max = 50 ans), ce qui suggère que les efforts de recherche se sont principalement concentrés sur les effets observés à court et moyen terme.

Précaution de lecture sur les pourcentages dans cette section

Certaines variables du codage étaient définies comme des catégories à choix multiples. Les pourcentages présentés dans cette section sont donc calculés à partir du nombre total d'occurrences codées, et non du nombre total d'articles ou d'études analysés.

Ainsi, une même publication pouvait être associée à plusieurs catégories simultanément. Par exemple, un article portant à la fois sur des parcs éoliens posés et flottants était comptabilisé dans chacune de ces catégories. Les pourcentages présentés ne sont donc pas nécessairement exclusifs et leur somme peut dépasser 100 %.

Répartition géographique et phases étudiées

À l'échelle des 411 articles (n = nombre d'articles), la majorité des recherches ont été menées sur des sites situés en Europe et en Amérique du Nord. Au total, 29 pays et 26 mers ou océans sont représentés dans le corpus issu de la revue systématique. Le Royaume-Uni (n = 76) et l'Allemagne (n = 67) occupent les premières places, tandis que la France se situe au 7^e rang avec 25 articles.

Les résultats suggèrent que les travaux de recherche se répartissent différemment selon les phases de développement des parcs, en fonction des contextes nationaux. Les recherches menées dans certains pays se concentrent davantage sur la phase de pré-construction (ex. États-Unis, France), tandis que celles conduites dans d'autres portent principalement sur la phase d'exploitation (ex. Belgique). La France se distingue par une proportion notable d'études fondées sur des scénarios prospectifs ou des expérimentations en laboratoire.

La mer du Nord (n = 188) est la région maritime sur laquelle se concentre la majorité des articles, suivie par l'océan Atlantique Nord (n = 72). En tenant compte des phases de développement et de la proximité géographique des sites étudiés, 99 parcs éoliens en mer distincts ont été identifiés comme ayant fait l'objet d'au moins une étude. Le parc éolien en mer C-Power, en Belgique, mis en service en 2009, apparaît comme le site le plus étudié (n = 28). Toutefois, seules certaines catégories de groupes biologiques y ont été étudiées, principalement les céphalopodes, les oiseaux et des catégories définies à un niveau plus agrégé — telles que les écosystèmes, les communautés, les réseaux trophiques ou les habitats — qui ne peuvent être dissociées en groupes biologiques distincts. Cette répartition inégale des objets d'étude illustre l'hétérogénéité des pressions et des groupes biologiques considérés, particulièrement marquée dans les parcs éoliens en mer d'Europe du Nord.

Seuls 49 % des articles (n = 202) précisent le type de parc éolien en mer étudié ; parmi eux, 89,1 % concernent des parcs à fondations fixes (n = 180) et 6,4 % (n = 13) concernent des parcs flottants. La phase d'exploitation est la plus documentée (n = 176, soit 30 % des articles). À l'inverse, un seul article porte sur le démantèlement et deux sur l'après-démantèlement, ce qui reflète le nombre encore très limité de parcs effectivement démantelés à ce jour (trois au total).

Les articles fondés sur un cadre méthodologique *in situ* représentent 60 % des publications (n = 275). Parmi eux, seuls 57 % intègrent un comparateur ou un contrôle spatial et/ou temporel.

Espèces et groupes biologiques étudiés

À l'échelle des 518 études (ns = nombre d'études) (Figure 3), 288 espèces distinctes sont représentées. Les trois espèces les plus fréquemment étudiées sont *Phocoena phocoena* (mammifère marin – marsouin commun ; ns = 43), *Gadus morhua* (poisson – cabillaud de l'Atlantique ; ns = 22) et *Morus bassanus* (oiseau – fou de Bassan ; ns = 20).

S'agissant des groupes biologiques, la majorité des études porte sur les oiseaux (ns = 129), suivis des macro-invertébrés benthiques (ns = 104), des poissons (ns = 94) et des mammifères marins (ns = 78). Les reptiles (ns = 1) et les micro-organismes autres que le phytoplancton (ns = 4) figurent parmi les groupes les moins étudiés.

Pressions étudiées et combinaisons « pression × groupe biologique »

En ce qui concerne les pressions, la majorité des études porte sur les structures en tant qu'obstacle physique au déplacement de la faune mobile marine (faune volante et sous-marine), susceptibles d'induire des collisions (effet collision) ou des comportements d'évitement (effet barrière) (ns = 129), sur l'introduction de substrats durs artificiels (ns = 106) et sur les émissions sonores (ns = 104).

Les émissions de substances chimiques (ns = 2), ainsi que l'introduction d'espèces non indigènes (ns = 4), figurent parmi les pressions les moins documentées.

Le croisement entre groupes biologiques et pressions met en évidence un nombre important de combinaisons encore non étudiées, avec 51,9 % de combinaisons de catégories de pression et de groupes biologiques non documentées dans le corpus (NA dans la Figure 3). Certaines combinaisons pertinentes restent peu étudiées, par exemple l'introduction d'espèces non indigènes × oiseaux (ns = 0) et poissons (ns = 0), ou l'introduction de substrats durs artificiels × mammifères marins (ns = 0). Les efforts de recherche apparaissent fortement déséquilibrés selon les combinaisons « pression × groupe biologique ». Trois combinaisons concentrent ainsi une part importante des études du corpus et figurent parmi les plus documentées :

- Structures en tant qu'obstacle physique au déplacement × Oiseaux (ns = 112 ; 21,6 % des 518 études) ;
- Émissions sonores × Mammifères marins (ns = 58 ; 11,2 %) ;
- Introduction de substrats durs artificiels × Macro-invertébrés benthiques (ns = 45 ; 8,7 %).

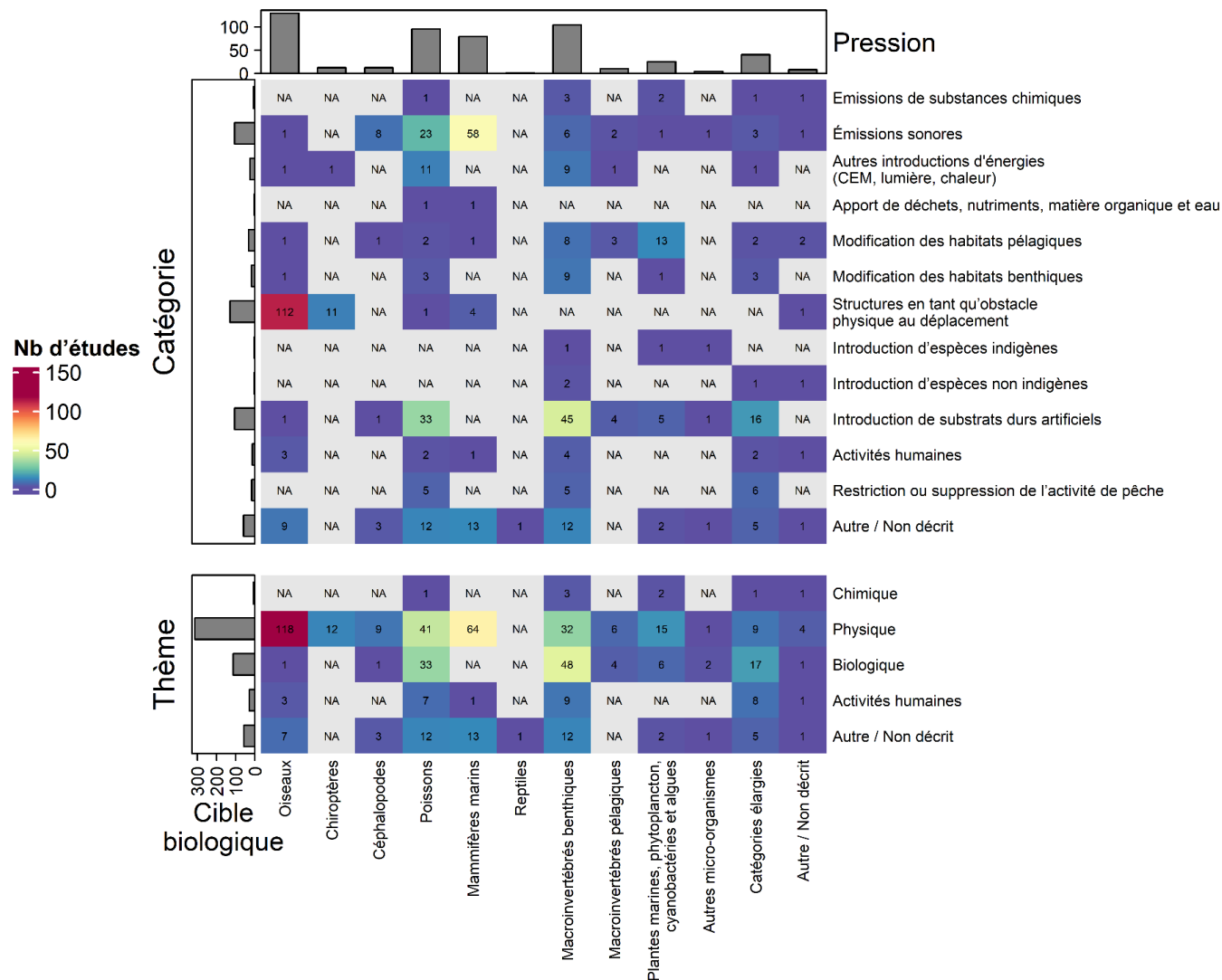


Figure 3. « Heatmap » croisant les groupes biologiques avec les thèmes et catégories de pressions générées par les parcs éoliens en mer. La carte est divisée en deux sections principales : les thèmes de pressions, présentés en bas, et leurs catégories, présentés en haut.

EBV et qualification des effets

Les variables essentielles de la biodiversité (EBV) ont été mobilisées pour caractériser les effets des différentes combinaisons « pression × groupe biologique » selon différents niveaux d'organisation biologique. La majorité des études s'est concentrée sur les variables relatives aux populations d'espèces (par exemple : distribution, abondance ; ns = 298) et sur les traits d'histoire de vie (par exemple : physiologie, mouvements ; ns = 254).

Une seule étude s'est intéressée à la composition génétique. Les travaux portant sur les effets à l'échelle des communautés (ex. diversité taxonomique) et des écosystèmes (structure et fonctionnement, notamment productivité primaire) demeurent limités.

Ces résultats traduisent un cadrage principalement centré sur les échelles spécifique et populationnelle, plutôt que sur des échelles plus fines (diversité génétique, capacité adaptative) ou plus intégrées (approches écosystémiques).

La majorité des EBV codées mettent en évidence un effet (ns = 469) sur le récepteur biologique étudié en réponse à la pression considérée. Des effets mixtes — c'est-à-dire des situations dans lesquelles les résultats disponibles montrent des effets dans certains cas et des absences d'effet dans d'autres, selon les espèces, les contextes, les méthodes ou les conditions étudiées — sont également rapportés (ns = 184), de même que des absences d'effet (ns = 104). Il convient de préciser que ces effets n'ont pas été qualifiés de « positifs » ou de « négatifs », cette distinction dépendant du contexte écologique dans lequel ils s'inscrivent.

Combinaisons statistiquement interprétables

Seules les combinaisons « pression × groupe biologique » reposant sur un nombre suffisant d'études (ns > 20 = seuil d'interprétation retenu) ont été considérées comme statistiquement interprétables, des effectifs plus faibles ne permettant pas d'estimer de manière robuste les proportions de résultats indiquant un effet ou une absence d'effet (Figure 4).

Parmi les combinaisons suffisamment documentées, les proportions les plus élevées de résultats indiquant un effet concernent l'introduction de substrats durs artificiels pour de larges catégories de groupes biologiques (98,2 % d'effets, ns = 55), les émissions sonores chez les mammifères marins (86,6 %, ns = 82), la modification des habitats benthiques chez les macro-invertébrés benthiques (86 %, ns = 25), ainsi que les structures en tant qu'obstacle physique au déplacement chez les oiseaux (81 % d'effets, ns = 105 ; Figure 4). Les deux premières combinaisons n'ont, par ailleurs, fait l'objet d'aucune étude mettant en évidence une absence d'effet (Figure 5).

À l'inverse, toujours au sein des combinaisons suffisamment documentées, les plus faibles proportions de résultats indiquant un effet — et donc les plus fortes proportions d'absences d'effet — concernent les autres introductions d'énergies (champs électromagnétiques, lumière, chaleur) chez les macro-invertébrés benthiques (38,9 % d'effets, ns = 27) et chez les poissons (42,1 % d'effets, ns = 19, soit un effectif proche du seuil d'interprétation retenu ; Figure 4).

Certaines combinaisons se distinguent par ailleurs par une prédominance de résultats indiquant des effets mixtes (≥ 5 études). C'est notamment le cas de la modification des habitats pélagiques chez les macro-invertébrés pélagiques (80 % d'effets mixtes, ns = 5), les activités humaines pour des catégories larges de groupes biologiques (80 %, ns = 5), ainsi que, chez les poissons et les macro-invertébrés benthiques, certaines pressions telles que les activités humaines, la modification des habitats benthiques, l'introduction d'espèces non indigènes et les émissions sonores (environ 60 % d'effets mixtes ; Figure 5).

Ces résultats reposent toutefois sur un nombre limité d'études et restent susceptibles d'évoluer à mesure que de nouvelles données seront disponibles.

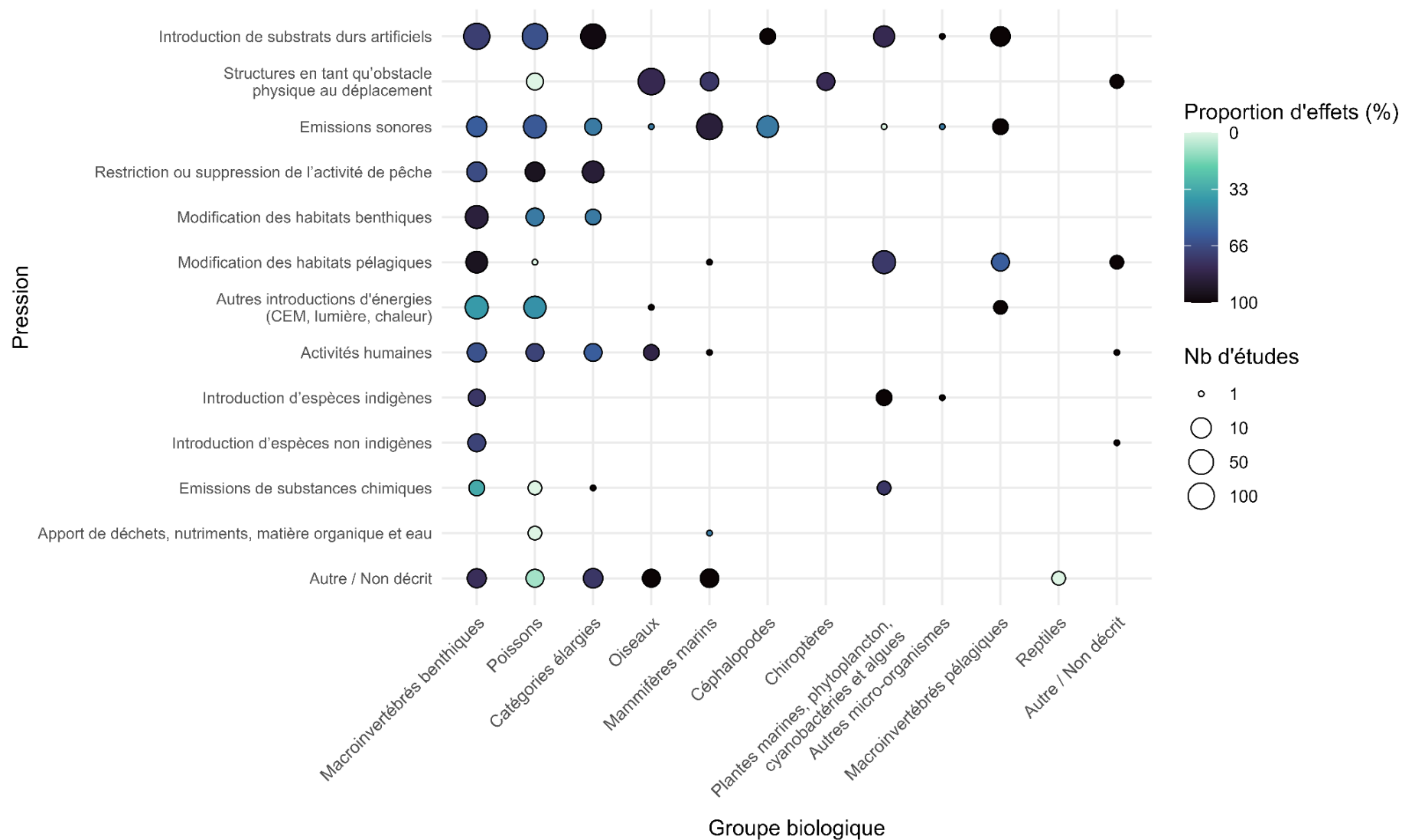


Figure 4. Proportion d'études rapportant un effet pour chaque combinaison « pression × groupe biologique », et nombre d'études associées. Les proportions d'effet présentées correspondent à une moyenne pondérée des résultats d'EBV, dans laquelle les catégories « effet », « effet mixte » et « absence d'effet » sont respectivement pondérées par 1, 0,5 et 0.

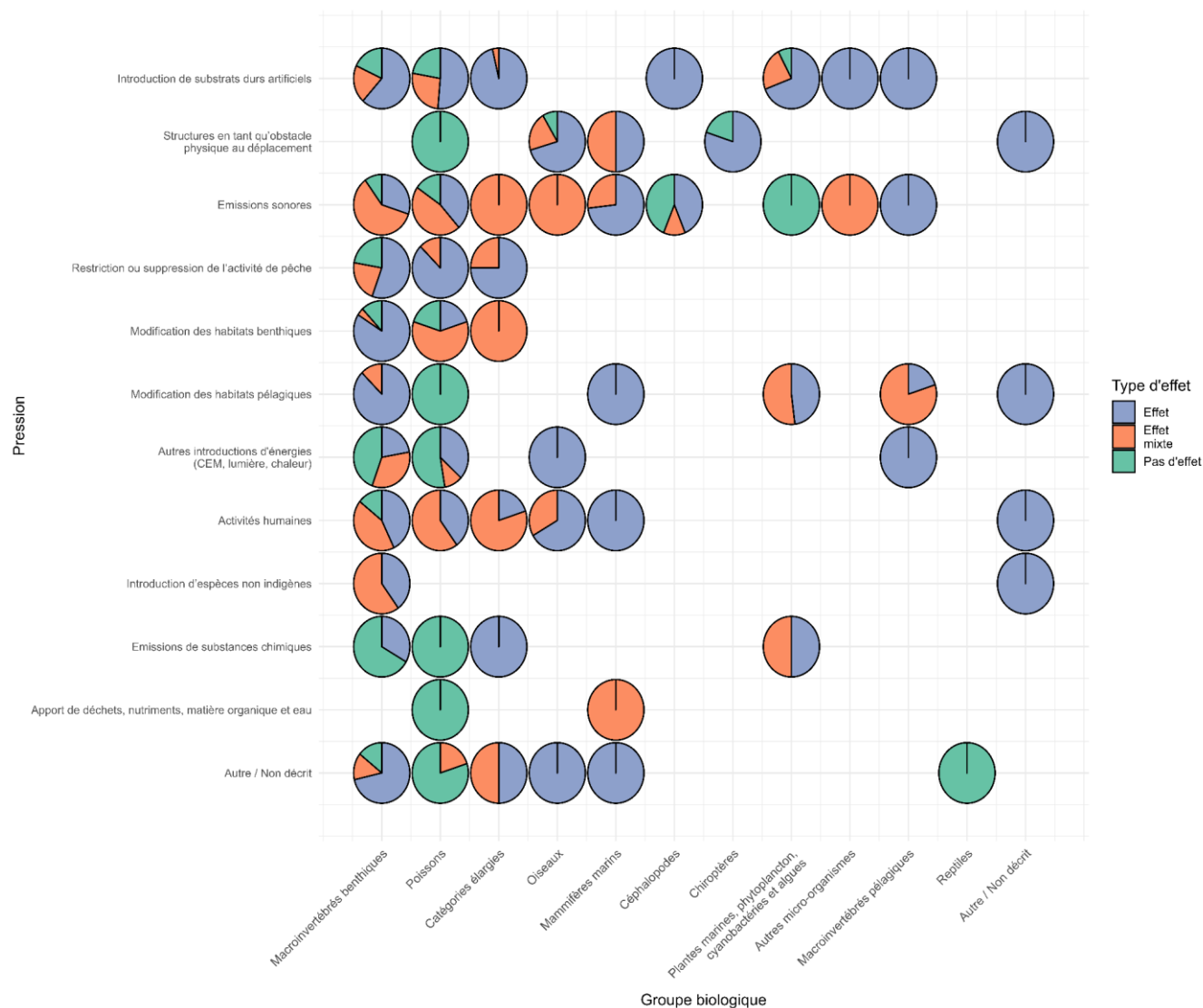


Figure 5. Répartition des types de résultats observés (effet, absence d'effet ou effet mixte) selon les combinaisons « pression × groupe biologique ». Les proportions représentées correspondent au nombre d'études dans chaque catégorie de résultat (effet, effet mixte ou absence d'effet), sans pondération par catégorie de résultat.

Zoom sur la France

Les recherches menées en France hexagonale représentent un sous-ensemble relativement restreint du corpus global, avec 25 articles correspondant à 34 études. Elles se concentrent géographiquement sur la Manche, l'Atlantique Nord et la mer du Nord. Aucun article du corpus ne concerne les côtes méditerranéennes.

À l'échelle des articles, ces travaux reflètent globalement les tendances de recherche observées à l'international en ce qui concerne les types de parcs éoliens en mer et les groupes biologiques étudiés, avec une prédominance de l'éolien posé et un intérêt marqué pour des analyses conduites à l'échelle du parc.

Les recherches menées en France s'en distinguent toutefois par une orientation méthodologique davantage tournée vers les phases amont du développement des parcs, avec une attention plus marquée portée à la pré-construction ainsi qu'aux études fondées sur des scénarios ou des expérimentations en laboratoire. Cette orientation se traduit par un recours plus important à la modélisation (56,7 %) qu'aux études *in situ* (30 %). En conséquence, plusieurs dimensions restent relativement peu documentées dans les travaux menés en France, notamment les phases d'exploitation et de démantèlement, ainsi que les études *in situ* intégrant un comparateur ou un contrôle spatial et temporel.

À l'échelle des études, les recherches menées en France s'écartent davantage des tendances observées à l'international en ce qui concerne les récepteurs biologiques et les pressions étudiées. On observe notamment une surreprésentation de catégories biologiques définies de manière large (44,1 % des études), une moindre attention portée aux oiseaux (17,6 %), ainsi qu'une priorisation des effets associés à l'introduction de substrats durs artificiels (29,4 %), aux structures en tant qu'obstacle physique au déplacement (20,6 %) et à la restriction ou à la suppression des activités de pêche (« effet réserve ») (14,7 %).

Malgré ces différences, les tendances observées concernant les EBV apparaissent globalement comparables entre les recherches menées en France et celles conduites à l'international. Quelques spécificités se dégagent néanmoins du corpus français. Les études françaises accordent ainsi une place relativement plus importante aux traits de vie des espèces (25 %) qu'aux variables relevant du niveau populationnel (23,7 %). Elles rapportent par ailleurs une proportion plus élevée de résultats indiquant un effet (56,1 %, contre 42,3 % dans la littérature internationale). Ces écarts doivent toutefois être interprétés avec prudence, car ils peuvent refléter des différences de contexte et de méthodologie entre les travaux analysés, notamment le caractère plus récent du développement de l'éolien en mer en France, la place importante des études de modélisation et des scénarios prospectifs, ainsi que le nombre encore limité d'articles relatifs au contexte français identifiés dans la revue systématique de la littérature (n = 25).

Dans l'ensemble, les combinaisons groupe biologique–pression–EBV mises en évidence dans la littérature scientifique portant sur les eaux françaises sont dominées par les études consacrées aux effets de l'introduction de substrats durs artificiels, en particulier sur les récepteurs benthiques et les catégories biologiques définies de manière large. À l'inverse, certaines pressions — telles que les émissions chimiques, l'introduction d'espèces non indigènes, ainsi qu'un éventail plus large d'effets potentiels sur les poissons — demeurent encore peu explorées.

Conclusion de cette cartographie de la littérature

Cette synthèse systématique offre un aperçu structuré des tendances, des lacunes de connaissances et des controverses scientifiques susceptibles d'éclairer les recherches à conduire en matière d'atténuation — y compris les politiques associées — des effets des parcs éoliens en mer. Elle met également à disposition, pour chaque étude, un ensemble de données relatives à des variables contextuelles telles que le type d'étude, la durée des travaux, les composantes des parcs éoliens étudiées ainsi que les variables géographiques (parcs, pays, régions maritimes ou océaniques).

Une augmentation notable des publications est observée à partir de 2006, avec une accélération particulièrement marquée entre 2018 et 2023, en lien avec le développement de l'éolien en mer, la mise en place de directives et de réglementations, ainsi que le financement de programmes de recherche et de suivi dédiés. Avec 518 études

réparties dans 411 articles, la cartographie et la revue systématique réalisée dans le cadre de l'ESCo constituent à ce jour l'exercice le plus exhaustif sur ce sujet, avec un corpus analysé plus important que ceux mobilisés dans les revues précédentes (Galparsoro *et al.*, 2022 ; Papathanasopoulou *et al.*, 2016 ; Thomassen *et al.*, 2025). Cette ampleur s'explique notamment par le recours à une requête bibliographique particulièrement large, fondée sur plus de 700 mots-clés et appliquée à trois bases de données bibliographiques, contre deux dans les travaux antérieurs.

Sur le plan géographique, les pays européens et nord-américains contribuent de manière prépondérante à la production scientifique relative à l'éolien en mer. Le développement de cette filière ayant débuté en Europe, les pays riverains de la mer du Nord occupent une place centrale dans la production des connaissances, en lien avec l'installation précoce des premiers parcs dans cette région. La Chine joue désormais un rôle majeur dans le secteur de l'énergie éolienne en mer, avec près de la moitié de la capacité installée mondiale en 2025 (GWEC, 2025), mais demeure encore relativement peu représentée dans la littérature scientifique consacrée aux effets sur la biodiversité.

Le corpus présente toutefois de fortes asymétries. Les éoliennes flottantes demeurent peu étudiées, alors même que leurs effets sur la biodiversité pourraient différer de ceux observés pour l'éolien posé, en raison de caractéristiques écologiques et physiques distinctes des milieux concernés, notamment liées à leur implantation plus éloignée des côtes et dans des zones de plus grande profondeur. Certaines composantes technologiques propres à ces dispositifs, comme les câbles d'ancrage, pourraient en outre générer des effets spécifiques absents dans les configurations à fondations fixes. Les effets à long terme restent largement méconnus, la durée moyenne des études analysées demeurant très inférieure à la durée de vie des parcs (Coates *et al.*, 2015). Par ailleurs, le suivi de la biodiversité sur l'ensemble du cycle de développement des parcs apparaît davantage documenté dans la littérature grise (Szostek *et al.*, 2024), ce qui souligne l'intérêt de mieux articuler les évaluations environnementales réglementaires et la production scientifique. Les phases de démantèlement et de post-démantèlement restent particulièrement peu documentées : un seul article traite du démantèlement, deux de l'après-démantèlement, alors que seuls trois parcs éoliens en mer ont atteint ce stade à ce jour (Yttre Stengrund en 2015, Vindeby en 2017 et Blyth en 2019). Cette lacune apparaît d'autant plus significative que plusieurs centaines de turbines atteindront leur fin de vie dans les prochaines années (Dannheim *et al.*, 2020 ; Lemasson *et al.*, 2023), impliquant un besoin croissant de connaissances sur les effets associés à ces phases.

Plusieurs déséquilibres apparaissent également dans les objets étudiés, qu'il s'agisse des pressions, des récepteurs biologiques ou des variables mobilisées pour qualifier les effets. Les mammifères marins, les oiseaux et certains grands groupes d'espèces comme les macro-invertébrés benthiques et les poissons concentrent une part importante des travaux. Les pressions les plus étudiées concernent les modifications de l'environnement physique — structures en tant qu'obstacle au déplacement, émissions sonores, modification des habitats pélagiques — ainsi que l'introduction de substrats durs artificiels, tandis que les émissions chimiques et plusieurs autres pressions biologiques restent peu documentées. Cette distribution inégale s'explique en partie par la complexité de l'évaluation des réponses biologiques, les difficultés méthodologiques associées à certaines pressions, ainsi que par des associations plus directes entre certaines pressions et certains récepteurs biologiques (structures en tant qu'obstacle physique au déplacement pour les oiseaux, introduction de substrats durs artificiels pour les macro-invertébrés benthiques, émissions sonores pour les mammifères marins). Elle tient également au fait que les protocoles de suivi privilégient certaines variables, telles que la distribution spatiale, l'abondance, la mortalité ou le comportement.

L'une des principales contributions de cette revue systématique réside dans l'intégration des Variables Essentielles de la Biodiversité (EBV) comme cadre de classification des effets observés. Les EBV constituent aujourd'hui un référentiel reconnu à l'échelle internationale pour le suivi de l'évolution de la biodiversité (Dalton *et al.*, 2024). Leur mobilisation permet de relier les résultats scientifiques à des indicateurs directement mobilisables dans les évaluations d'impact, la gestion environnementale et l'élaboration de politiques publiques. Dans le contexte de l'éolien en mer, elles offrent un cadre utile pour orienter la conception des suivis, hiérarchiser les mesures d'atténuation et apprécier les effets écologiques des projets (Proença *et al.*, 2017).

Dans le corpus analysé, l'existence d'un effet est 4,5 fois plus fréquemment rapportée qu'une absence d'effet, de manière relativement constante entre les différentes catégories d'EBV. L'existence éventuelle d'un biais de publication, lié à une plus forte valorisation des résultats positifs ou significatifs, ne peut être exclue. Toutefois,

une analyse comparative entre littérature scientifique et littérature grise portant sur les effets des éoliennes en mer sur les services écosystémiques suggère que la littérature grise rapporte encore moins fréquemment des absences d'effet ou des résultats non concluants (Szostek *et al.*, 2024). Les efforts de recherche se concentrent principalement sur les niveaux écologiques les plus directement accessibles à l'observation, en particulier les populations et les traits de vie des espèces, tandis que des dimensions clés telles que la diversité génétique, le fonctionnement des écosystèmes et les systèmes socio-écologiques restent peu documentées. Ces déséquilibres reflètent des contraintes méthodologiques, techniques et économiques, mais limitent la capacité à appréhender les effets cumulés, indirects ou à long terme des parcs éoliens en mer. Le développement d'approches plus intégrées et pluridisciplinaires apparaît ainsi essentiel pour mieux caractériser la résilience des écosystèmes et appuyer une gestion adaptative fondée sur des connaissances consolidées.

PARTIE 3

**L'analyse des résultats
« pression par pression »**

1. Structures en tant qu'obstacle physique au déplacement (effet barrière et collisions)

1. Description de la pression et hypothèses d'effets

Les éoliennes en mer, en tant que structures physiques émergentes et immergées introduites dans l'espace marin, sont susceptibles de constituer un obstacle au déplacement tridimensionnel de certains organismes mobiles. Cette pression concerne en particulier la faune volante (oiseaux marins, oiseaux terrestres migrateurs, chiroptères), mais pourrait également affecter la mégafaune marine (mammifères marins, tortues marines), ainsi que certains poissons potentiellement, par des phénomènes de dérangement et de modification des trajectoires de déplacement.

Deux grands types d'effets sont associés à cette pression (Figure 6) :

- Le risque de collision comprend à la fois les collisions avec les pales en rotation — et, plus rarement, avec les mâts — ainsi que les barotraumatismes, c'est-à-dire des lésions internes provoquées par les variations brutales de pression dans le sillage des pales (effet généralement léthal chez les chiroptères et petites espèces d'oiseaux) ;
- L'effet barrière correspond à des comportements d'évitement induits par la présence des éoliennes en mer, conduisant les organismes à modifier leurs trajectoires afin de contourner les installations ou à se relocaliser dans des zones potentiellement sous-optimales. À l'inverse, certaines espèces ou certains individus peuvent être attirés à des degrés variables par ces structures anthropiques marines.

Ces effets peuvent se manifester à différentes échelles spatiales d'évitement :

- À la micro-échelle, par l'évitement d'une pale ;
- À la méso-échelle, par l'évitement d'une éolienne individuelle ;
- À la macro-échelle, avec un évitement à l'échelle d'un parc ou de plusieurs parcs, contribuant à l'effet barrière ;
- À l'échelle régionale ou transnationale, lorsque les individus rencontrent plusieurs parcs éoliens lors de leurs déplacements (exemple : le long d'une route migratoire).

La fréquence et l'intensité de ces effets dépendent de multiples facteurs, notamment la phénologie des espèces et leurs caractéristiques intrinsèques, les conditions environnementales, ainsi que la configuration des parcs éoliens.

Cadre analytique – Synthèse des effets potentiels associés aux éoliennes en mer en tant qu'obstacles physiques au déplacement de la faune mobile marine (Figure 6)

- Une mortalité directe liée aux collisions et aux barotraumatismes, principalement pour les oiseaux et les chiroptères, ainsi que des lésions potentiellement occasionnées par les câbles des éoliennes flottantes pour les mammifères marins (risques d'enchevêtrement) ;
- Des modifications des trajectoires de déplacement, notamment lors des migrations ou des déplacements fonctionnels ;
- Une augmentation des coûts énergétiques liée au contournement des parcs ;
- Une réduction ou une perte d'habitats fonctionnels (ex. zones d'alimentation), incluant la relocalisation d'individus sur des habitats suboptimaux, moins favorables au maintien des populations, voire des espèces ;
- Des répercussions potentielles à l'échelle des populations, en matière de démographie et de répartition spatiale.

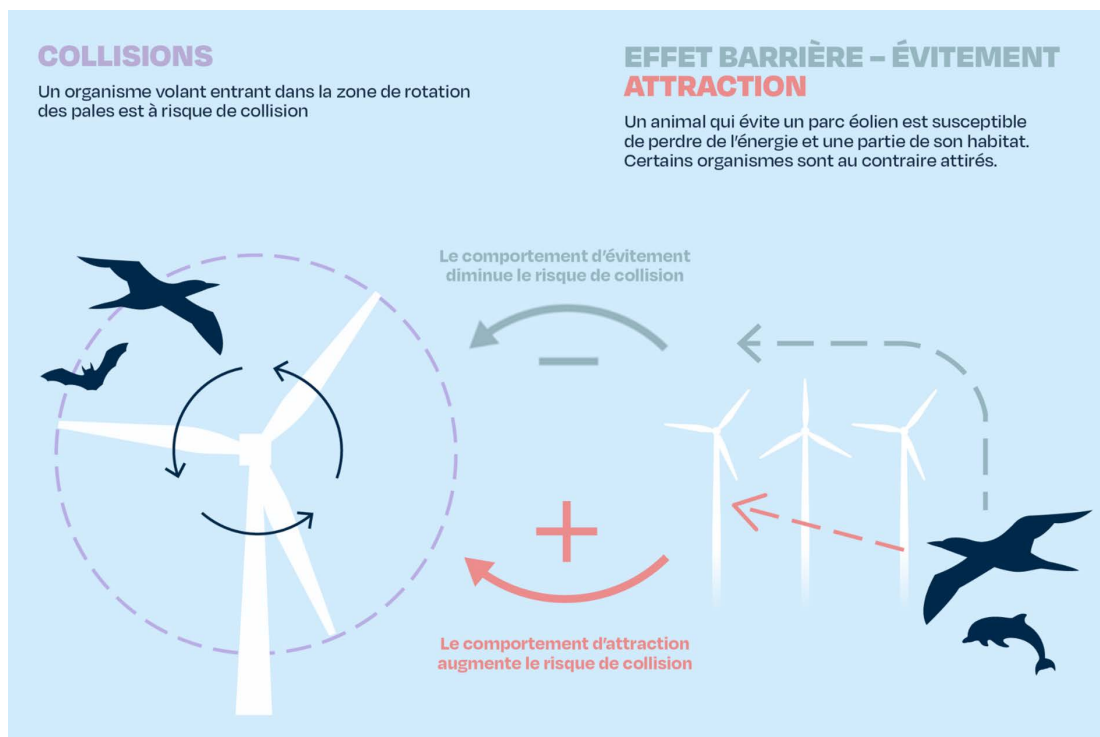


Figure 6. Synthèse des principaux effets potentiels directs associés aux éoliennes en mer en tant qu'obstacles physiques au déplacement de la faune mobile marine.

2. Description du corpus de la revue systématique

Le corpus analysé comprend 123 articles publiés entre 1998 et 2024, avec une accélération des publications ces dernières années (les sept dernières années concentrant la moitié des publications).

La littérature présente de forts biais géographiques et taxonomiques. L'écrasante majorité des études concerne l'Europe du Nord (mer du Nord, mer Baltique, plus marginalement la Manche et les mers Celtiques), ainsi que, dans une moindre mesure, l'Amérique du Nord. Aucune étude ne porte directement sur des parcs éoliens français.

Sur le plan taxonomique, 92 % des études concernent les oiseaux, principalement les oiseaux marins, et secondairement les oiseaux terrestres migrateurs. Les études portant sur les chiroptères et les mammifères marins sont très minoritaires. Aucune étude du corpus ne traite directement des tortues marines ni des poissons dans le cadre de cette pression.

Les études ont été classées selon plusieurs catégories méthodologiques :

- Études *in situ* mesurant des effets dans ou autour de parcs éoliens, en phase de construction ou d'exploitation ;
- Études de référence pré-construction (*in situ* ou *ex situ*) visant à caractériser l'utilisation de l'espace avant implantation ;
- Modélisations, scénarios et cadres méthodologiques, sans mesures directes d'effets ;
- Études sur des structures comparables semi-offshore, comprenant des données d'observation et/ou des mesures d'effets réalisées sur des sites éoliens dits « semi-offshore », par exemple installés sur des digues à la mer ou des îlots artificiels.

Les méthodologies *in situ* se concentrent principalement sur l'effet barrière et les comportements d'évitement. Les risques de collision sont presque exclusivement abordés par des approches de modélisation et quelques rares mesures *in situ*, notamment en milieu semi-offshore.

3. État des connaissances - Ce que dit la science

Chiroptères

Les études sur les chauves-souris (chiroptères) restent très rares, en raison des difficultés de détection et d'observation en milieu marin. La majorité des travaux concerne la phase de pré-construction. Seules deux études ont réalisé des mesures de présence et de comportement sur des parcs éoliens en exploitation. Un consensus se dégage sur la vulnérabilité des chauves-souris migratrices longue distance, notamment les noctules (genre *Nyctalus*) et les pipistrelles de Nathusius (*Pipistrellus nathusii*), dont la présence en mer est avérée durant les périodes de migration, de nuit comme de jour, et plus marginalement en période estivale.

Aucune étude ne rapporte de collision observée, ni de taux d'évitement mesuré. Toutefois, plusieurs travaux suggèrent que des événements de collision sont très probables, en particulier en lien avec un effet d'aubaine alimentaire : les chiroptères sont attirés par les insectes eux-mêmes attirés par l'éclairage des éoliennes, ce qui pourrait accroître les risques de collision. La vulnérabilité des chiroptères aux collisions est largement démontrée en contexte terrestre où des mesures de réduction des effets (telles que le bridage des turbines lorsque les conditions météorologiques sont favorables aux activités de chasse et de déplacement) commencent à être mises en place en Europe, y compris en France.

Oiseaux marins

Effet barrière

L'effet barrière est l'effet le plus fréquemment documenté pour les oiseaux marins. Environ 65 % des études concluent à une modification de l'utilisation de l'espace ou du comportement, notamment des déplacements ou des changements dans les zones d'alimentation.

Les réponses comportementales s'inscrivent sur un continuum allant de l'aversion forte à l'attraction, selon les espèces. Les espèces les plus vulnérables à l'effet barrière sont celles présentant la plus forte aversion, telles que les plongeurs (genre *Gavia*) et les alcidés. La vulnérabilité est d'autant plus forte que les espèces présentent un fort degré de spécialisation alimentaire, ainsi que chez celles dont le statut de conservation est défavorable. Elle est également accrue en période de reproduction et, pour les espèces côtières, en période d'hivernage.

En période de reproduction, le fou de Bassan (*Morus bassanus*) apparaît comme l'espèce la plus concernée par l'effet barrière, tandis qu'en période hivernale, les plongeurs sont les plus affectés, un évitement ayant été mesuré dans 100 % des études. Des effets de déplacement et de réduction des zones d'alimentation sont également documentés pour les alcidés (petit pingouin *Alca torda*, guillemot de Troil *Uria aalge*) en périodes de reproduction et d'hivernage, ainsi que chez les anatidés (canards marins, oies), notamment lors des phases migratoires. À l'inverse, les laridés, en particulier les goélands (bruns *Larus fuscus*, marins *Larus marinus*, leucophées *Larus michahellis*, argentés *Larus argentatus*), sont plutôt attirés par les parcs, utilisant les éoliennes et leurs infrastructures associées, telles que les postes électriques, comme sites de repos et d'alimentation, notamment celles situées en périphérie des parcs. Les résultats sont plus contrastés pour les cormorans (famille des *Phalacrocoracidae*), tandis que le fulmar boréal (*Fulmarus glacialis*), la mouette tridactyle (*Rissa tridactyla*), les sternes (famille des *Sternidae*) et les puffins (famille des *Procellariidae*) semblent plutôt éviter les parcs éoliens selon certaines études. Toutefois, leur sensibilité à l'effet barrière apparaît moindre, avec des taux d'évitement faibles et/ou variables selon les études, ainsi qu'une forte variabilité individuelle observée pour certaines espèces, notamment les sternes et les mouettes tridactyles.

Les effets énergétiques indirects liés à l'évitement ont été modélisés dans deux études seulement, concluant à des effets négligeables pour les individus et les populations dans des contextes environnementaux favorables et à l'échelle d'un seul parc.

Effet collision

Les risques de collision sont principalement évalués par modélisation. Six études mobilisant des données collectées au sein de parcs en exploitation estiment ces risques pour plusieurs espèces, notamment les goélands, le fou de Bassan (*Morus bassanus*), la mouette tridactyle (*Rissa tridactyla*) et la sterne caugek (*Thalasseus sandvicensis*). Les espèces volant régulièrement à hauteur de rotor, en particulier de nuit, ainsi que celles qui pénètrent fréquemment dans les parcs pour s'y nourrir, apparaissent comme les plus exposées.

Les laridés (mouettes, goélands et espèces apparentées) figurent parmi les plus vulnérables, en raison de leur attraction pour les éoliennes et de leurs vols fréquents à hauteur de rotor, y compris de nuit. Bien que le fou de Bassan (*Morus bassanus*) présente globalement un fort taux d'évitement des parcs, certains individus pénètrent dans les parcs et volent régulièrement à hauteur de rotor, ce qui les expose également à un risque de collision, en particulier lorsqu'ils sont en recherche de nourriture. La disponibilité de données issues d'observations directes de collisions demeure très limitée, en raison des contraintes méthodologiques associées à la mise en œuvre de dispositifs de suivi à haute fréquence sur des périodes prolongées. Dans le corpus, une étude fait néanmoins état de la découverte de deux fous de Bassan morts à la suite d'une collision au sein d'un parc éolien en mer (Rothery *et al.*, 2009). Compte tenu de la faible probabilité d'échouage des cadavres sur les plages faisant l'objet des suivis, ainsi que des problèmes de détection et de persistance des carcasses, cette donnée ne saurait être considérée comme anodine ou anecdotique.

À l'inverse, les espèces volant majoritairement au ras de l'eau (puffins, alcidés, plongeurs, canards marins hors période de migration) sont considérées comme moins sensibles au risque de collision.

Les modélisations montrent enfin que la distance à la côte, la configuration des parcs éoliens, ainsi que les conditions environnementales et météorologiques constituent des facteurs majeurs de variation des niveaux de risque. Par exemple, plus la distance à la côte est faible, plus les éoliennes sont susceptibles de se situer dans l'aire de répartition d'espèces côtières en période de nidification. Des conditions météorologiques défavorables (vent fort, brouillard) influencent également l'altitude de vol des oiseaux et leur visibilité. Enfin, la taille, le nombre et l'espacement des éoliennes au sein d'un parc peuvent influencer les taux d'évitement aux macro- et méso-échelles.

Oiseaux migrants terrestres

Effet barrière

Pour les oiseaux migrants terrestres, 16 % des études documentent un effet barrière, avec des modifications de trajectoire de vol entraînant un allongement des parcours migratoires. Ces surcoûts énergétiques sont jugés probablement faibles à l'échelle d'un seul parc, mais pourraient avoir des implications plus larges selon les contextes.

Risque de collision

Concernant les collisions, une étude montre que les courlis cendrés (*Numenius arquata*) passent une grande partie de leur temps de vol en mer à des altitudes exposées aux rotors. Une autre étude estime que, lors de nuits de forte migration en mer du Nord, plusieurs dizaines de milliers de passereaux migrants - principalement des turridés - peuvent traverser un parc éolien en mer à hauteur de rotor, avec un potentiel de plusieurs centaines de collisions en une seule nuit (Brabant *et al.*, 2015). Les rapaces planeurs peuvent également être attirés par les éoliennes situées sur des corridors de migration, notamment en conditions météorologiques défavorables (Skov *et al.*, 2016).

Effets indirects sur les populations

Des effets indirects sur la démographie des populations sont abordés dans sept études, principalement chez le fou de Bassan (*Morus bassanus*). Les effets liés aux collisions, évalués par modélisation, sont jugés négligeables pour une colonie de la Manche exposée à un seul futur parc éolien (Warwick-Evans *et al.*, 2018), mais pourraient atteindre un niveau préoccupant lorsqu'ils sont extrapolés à l'échelle régionale, dans un contexte de multiplication des parcs, comme le prévoit la planification en mer du Nord ou en Manche (Cleasby *et al.*, 2015). Pour le goéland

brun (*Larus fuscus*) et le goéland marin (*Larus marinus*), une étude (Brabant *et al.*, 2015) conclut que l'effet cumulé d'un scénario réaliste de développement massif de l'éolien en mer du Nord (environ 10 000 éoliennes) pourrait entraîner des effets significatifs à l'échelle de leurs populations. Une telle ampleur de développement de l'éolien en mer est d'ailleurs considérée comme réaliste dans les décennies à venir (Brabant *et al.* 2015 ; Christiansen *et al.*, 2022).

Synthèse des effets documentés

La Figure 7 présente une synthèse des effets documentés dans la littérature scientifique, à partir d'exemples relatifs à différents groupes biologiques et à divers effets potentiels. La liste des effets présentée ici n'a pas vocation à être exhaustive, mais vise à refléter de manière représentative les principales conclusions issues de la revue systématique.

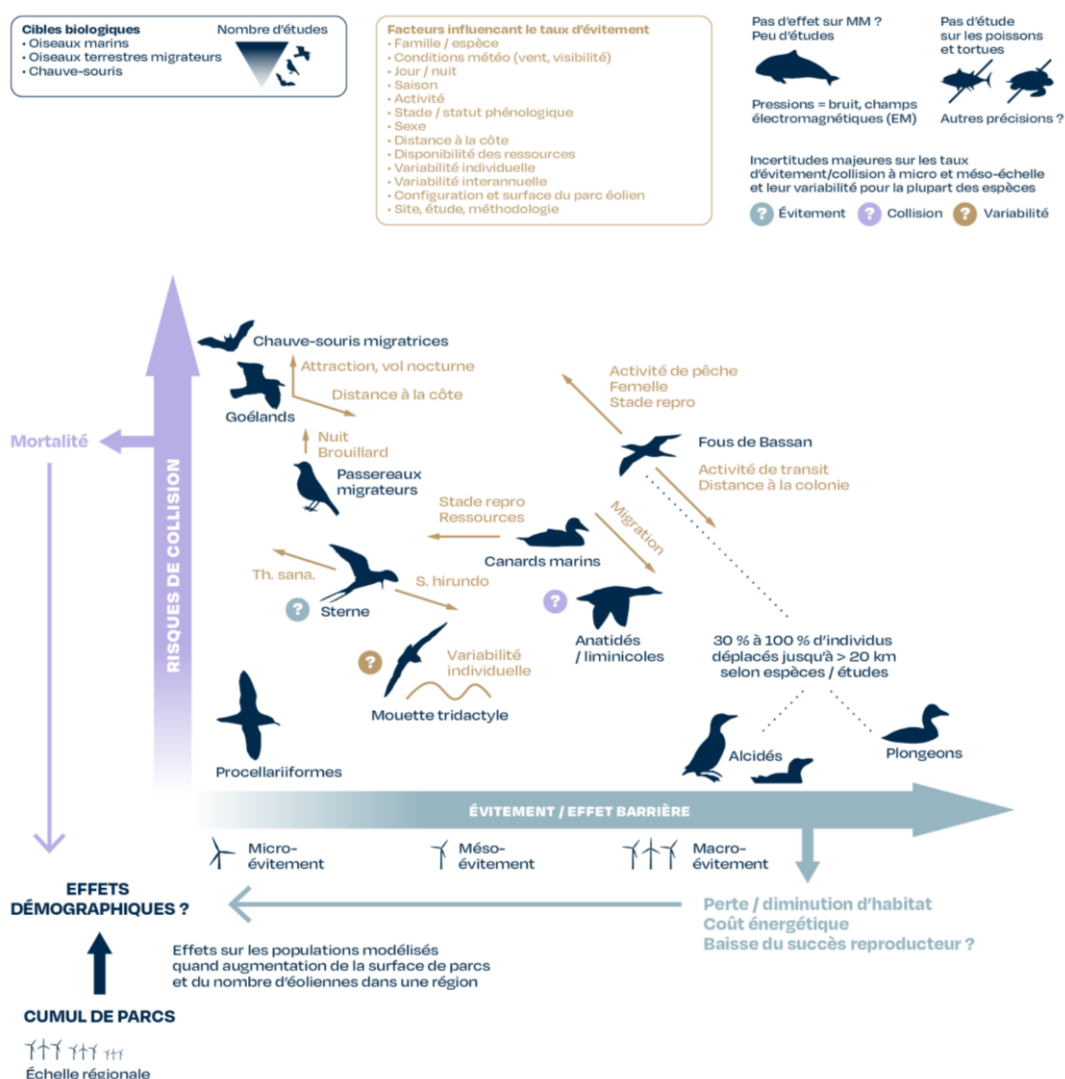


Figure 7. Synthèse non exhaustive des effets documentés dans les publications du corpus, fondée sur des exemples d'intensité des effets observés pour différents groupes biologiques, les facteurs influençant cette intensité, ainsi que les échelles spatiales concernées. MM = mammifères marins.

4. Incertitudes et lacunes de connaissances

Les résultats disponibles doivent être interprétés avec prudence au regard de lacunes importantes dans les connaissances sur les effets des éoliennes en mer comme obstacle physique au déplacement, notamment :

- Une forte dominance des études consacrées aux oiseaux, au détriment des chiroptères — pour lesquels les mesures d’effets demeurent quasi absentes — et des mammifères marins, ainsi que l’absence d’études spécifiques sur d’autres compartiments tels que les poissons ou les tortues marines, ou encore sur les risques d’enchevêtrement de mammifères marins dans les câbles dynamiques d’ancrage des éoliennes flottantes ;
- Une concentration des travaux sur un nombre limité d’espèces d’oiseaux, tandis que de nombreuses autres espèces restent peu ou pas étudiées, malgré des risques et effets souvent spécifiques ;
- Une quasi-absence de mesures *in situ* robustes des collisions, de la mortalité et des taux d’évitement pour la très grande majorité des espèces, les estimations reposant essentiellement sur des modèles et des scénarios ;
- Un manque de connaissances sur l’influence réelle des conditions météorologiques, mesurée *in situ*, sur les taux d’évitement à différentes échelles et sur les risques de collision.

Les effets cumulés de plusieurs parcs éoliens et les effets à long terme sur les populations restent peu documentés, malgré l’importance de prendre en compte l’additivité des mortalités liées aux collisions, comme cela a été modélisé pour les fous de Bassan (*Morus bassanus*) ainsi que pour les goélands brun (*Larus fuscus*) et marin (*Larus marinus*) (Cleasby *et al.*, 2015 ; Brabant *et al.*, 2015). En effet, au regard de leurs traits d’histoire de vie, les populations d’espèces longévives (c’est-à-dire caractérisées par une longue durée de vie, une maturité sexuelle tardive et une faible fécondité), telles que les oiseaux marins et les chiroptères, apparaissent particulièrement sensibles à la mortalité des individus, davantage qu’à une baisse du taux de reproduction.

Les principales limites méthodologiques et technologiques identifiées sont les suivantes :

- L’absence de moyen fiable pour mesurer les événements de collision et la mortalité en mer, notamment en raison de l’impossibilité de retrouver et de dénombrer les cadavres, contrairement au milieu terrestre ;
- Les limites de détection de la faune volante de petite taille et des espèces nocturnes autour des éoliennes, en particulier les passereaux et les chiroptères ;
- La méconnaissance de la distribution et du comportement en mer de la mégafaune marine, notamment de nuit et lorsque les conditions météorologiques ne permettent pas la réalisation de suivis aériens ou nautiques.

À ces éléments s’ajoutent des contraintes méthodologiques propres au milieu marin, qui limitent la fréquence, la durée et la robustesse des suivis.

5. Contextualisation des résultats à partir de la littérature complémentaire

Afin de compléter le corpus issu de la revue systématique et de répondre aux limites identifiées lors du processus de sélection, une littérature complémentaire a été mobilisée. Celle-ci comprend 79 publications évaluées par les pairs (dont deux revues de synthèse), ainsi que 10 rapports d’expertises scientifiques collégiales, une thèse et une base de données en ligne, incluant notamment des travaux issus de la littérature grise.

Ces sources portent sur des thématiques insuffisamment couvertes par le corpus de la revue systématique, telles que des mesures des taux d’évitement, l’estimation des mortalités, les hauteurs et vitesses de vol, ainsi que les risques de collision pour les mammifères marins.

La littérature complémentaire inclut également des études analogues menées sur des plateformes offshore, des éoliennes terrestres ou semi-offshore, ainsi que des travaux généraux relatifs aux collisions avec les infrastructures, aux comportements d’évitement de la faune volante et à l’influence des conditions météorologiques.

L’ensemble de ces éléments a permis de contextualiser les résultats issus de la revue systématique et d’en analyser la transposabilité, notamment dans un contexte maritime français peu documenté par des publications

scientifiques, les travaux nationaux étant majoritairement disponibles sous forme de rapports issus de programmes de recherche récents ou en cours.

L'analyse croisée met en évidence un déséquilibre marqué entre les études qui estiment les risques et celles qui mesurent effectivement les effets. Les contraintes logistiques propres au milieu marin limitent fortement les études de terrain, ce qui contribue à une incertitude élevée quant à l'ampleur réelle des effets.

Les éléments issus de la littérature complémentaire, potentiellement extrapolables à l'éolien en mer, permettent d'identifier des facteurs clés à prendre en compte dans l'étude des effets de l'éolien en mer en tant qu'obstacle aux déplacements de la faune mobile. Par exemple, l'activité des chauves-souris est régie par l'heure de la journée (avec un pic en première moitié de nuit), elle est minimale en cas de fortes précipitations et diminue lorsque la vitesse du vent dépasse $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Ces connaissances permettent d'établir un profil des périodes à risque au cours desquelles des mesures de bridage pourraient être mises en œuvre, notamment en période de migration.

Les oiseaux marins sont par ailleurs soumis à d'autres pressions anthropiques susceptibles d'altérer les tendances de population, telles que les captures accidentelles, la destruction des habitats de reproduction, la pollution marine, le changement climatique, le dérangement et l'introduction d'espèces prédatrices sur les sites de reproduction.

MESSAGES-CLÉS

- Les éoliennes en mer et leurs structures associées constituent des obstacles physiques permanents au déplacement de la faune volante, pouvant générer un effet barrière, des détournements de trajectoire et un risque de collision, en particulier pour les espèces présentant des déplacements directionnels marqués ou des comportements migratoires ;
- La littérature scientifique documente principalement des modifications de trajectoire et des comportements d'évitement ou de contournement, observés chez les oiseaux marins et les oiseaux migrants ;
- Les oiseaux marins constituent les groupes les plus étudiés et les plus concernés par ces effets, notamment les fous de Bassan, les alcidés, les plongeurs et les laridés ;
- Les chiroptères migrants « longue distance » sont également identifiés comme potentiellement vulnérables aux effets de barrière et aux collisions, bien que les données disponibles restent très limitées ;
- Les effets observés sont généralement localisés, d'intensité variable, et fortement dépendants des caractéristiques des structures, de leur densité, de leur disposition spatiale, du contexte environnemental, ainsi que des espèces concernées ;
- Les risques de collision sont majoritairement estimés par modélisation, les données de terrain directes restant très rares ;
- Les effets à l'échelle des populations demeurent incertains et peu documentés, en raison notamment du faible nombre d'études intégrant des approches à large échelle spatiale et temporelle, ou prenant en compte les coûts énergétiques liés aux comportements d'évitement ;
- Les connaissances restent limitées pour certains groupes, en particulier les espèces sous-marines (mammifères marins, tortues, poissons), pour lesquelles les interactions avec les obstacles physiques - y compris les câbles des éoliennes flottantes - sont encore très mal caractérisées ;
- L'interprétation des résultats nécessite une approche prudente et contextualisée, les effets étant fortement espèce-spécifiques et site-spécifiques ;
- La transposabilité de ces résultats aux eaux françaises est considérée comme globalement plausible pour les espèces communes avec l'Europe du Nord, notamment en ce qui concerne les comportements d'évitement. En revanche, l'évaluation des risques de collision et des effets démographiques demeure fortement dépendante des contextes locaux, des caractéristiques propres aux parcs éoliens, ainsi que de celles des populations concernées, en particulier leurs effectifs, leur structure et les domaines vitaux des colonies.

2. Introduction de substrats durs artificiels

1. Description de la pression et hypothèses d'effets

L'installation d'éoliennes en mer introduit des structures artificielles immergées (fondations et surfaces dures associées, telles que les enrochements) dans des zones majoritairement dominées par des substrats meubles. Ces structures modifient les caractéristiques physiques de l'environnement benthique et créent de nouveaux habitats artificiels, susceptibles d'être colonisés par des organismes inféodés aux substrats durs.

Ce phénomène, généralement désigné comme « effet récif », correspond à l'ensemble des interactions écologiques résultant du développement de communautés marines sur des structures artificielles immergées. Initialement étudié dans le cadre de récifs artificiels destinés à la pêche, à l'aquaculture et à la restauration des milieux, cet effet est désormais largement associé au déploiement d'infrastructures offshore, dont les parcs éoliens.

L'introduction de surfaces dures peut favoriser l'installation d'invertébrés benthiques fixés, attirer ou concentrer des poissons démersaux (espèces vivant à proximité du fond marin), et modifier les réseaux trophiques et certaines fonctions écologiques locales. Ces changements peuvent également interagir avec d'autres pressions anthropiques, notamment la pêche et l'introduction d'espèces non indigènes.

Cadre analytique – Synthèse des effets potentiels associés à l'introduction de substrats durs artificiels induits par les éoliennes en mer (Figure 8)

- Une augmentation locale de l'abondance et de la biomasse, notamment au sein des communautés benthiques et démersales ;
- Des modifications de la composition et de la diversité des communautés, y compris sur les substrats meubles adjacents ;
- L'installation d'espèces non indigènes, facilitée par la disponibilité de substrats artificiels ;
- Des modifications des interactions trophiques, liées à l'arrivée de nouvelles proies et à l'attraction de prédateurs ;
- Des changements fonctionnels associés au transfert de matière organique et à certains cycles biogéochimiques.

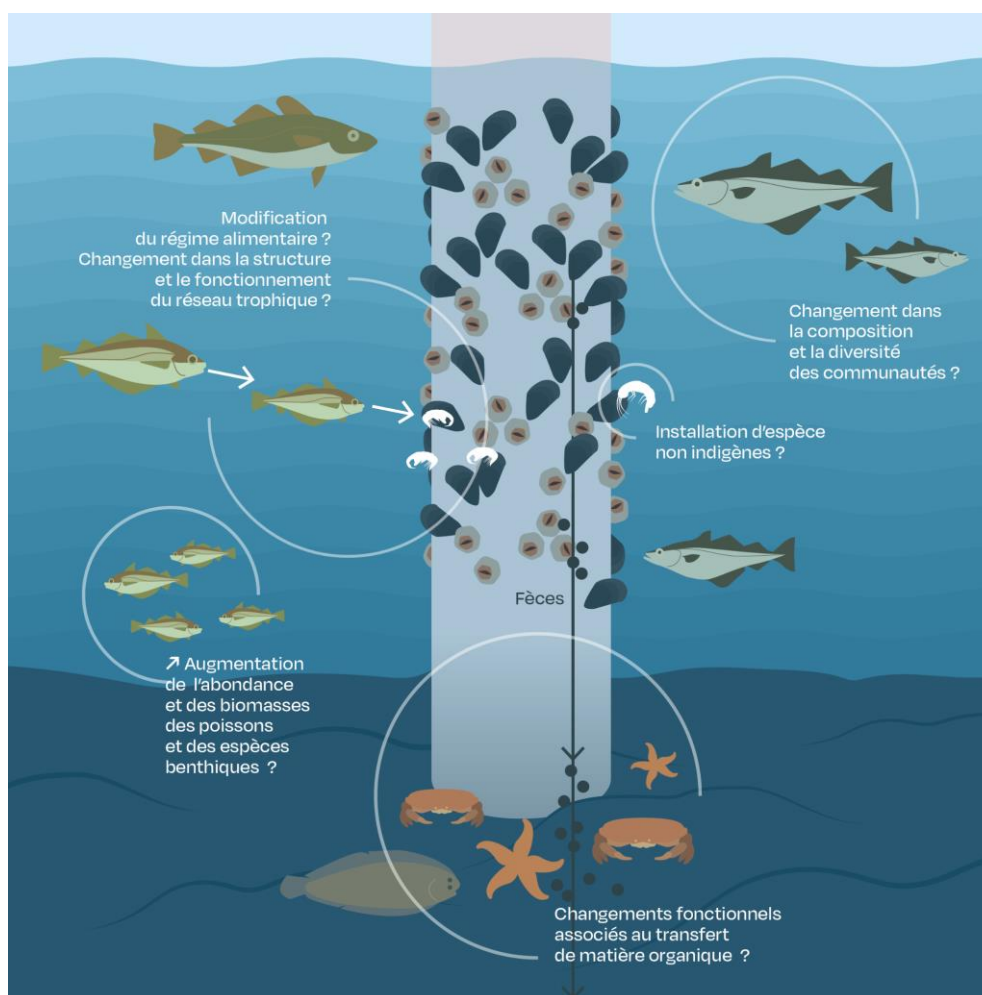


Figure 8. Synthèse des effets potentiels associés à l'introduction de substrats durs artificiels par les éoliennes en mer.

2. Description du corpus de la revue systématique

Le corpus mobilisé comprend 110 études issues de 58 articles, publiés entre 2006 et 2024, avec une forte concentration des publications entre 2019 et 2024, qui représentent environ la moitié des articles recensés.

Les travaux sont majoritairement localisés en mer du Nord, qui concentre près de la moitié des publications. D'autres zones sont également représentées, notamment la mer Baltique, l'Atlantique Nord, la Manche et la mer d'Irlande, tandis que les régions hors Europe sont très marginalement étudiées. À l'échelle nationale, les études sont réparties entre 11 pays, avec une prédominance de la Belgique, suivie de l'Allemagne, des Pays-Bas, de la Suède et de la France.

La grande majorité des études concerne des parcs implantés sur des substrats meubles (sables, vases, dunes). Les fondations monopieux et gravitaires sont les plus représentées ; aucune étude ne traite de l'effet récif associé aux éoliennes flottantes.

Les efforts de recherche se concentrent principalement sur les poissons et les macro-invertébrés benthiques, qui représentent ensemble plus de 85 % des études. Les autres groupes biologiques (producteurs primaires, micro-organismes, invertébrés pélagiques) sont très peu documentés.

3. État des connaissances – Ce que dit la science

Les résultats disponibles confirment l'existence d'un effet récif associé aux éoliennes en mer, se traduisant par des changements structurels marqués des communautés biologiques, et, dans une moindre mesure, par des modifications fonctionnelles (Figure 9).

Chez les macro-invertébrés benthiques, la majorité des études décrit une colonisation massive des structures par des espèces fixées ou associées aux substrats durs. Cette colonisation s'accompagne d'une augmentation importante de la biomasse et d'une modification de la composition locale des communautés benthiques (Figure 9). Par exemple, dans plusieurs parcs éoliens de la mer du Nord et de la mer Baltique, les communautés épibenthiques (organismes vivant à la surface des substrats) sont dominées par la moule commune *Mytilus edulis*, les amphipodes tubicoles du genre *Jassa* (notamment *Jassa herdmani*) et divers cirripèdes (Wilhelmsson *et al.*, 2006 ; Krone *et al.*, 2013). Il a été estimé qu'un seul mât d'éolienne pouvait héberger entre 1 et 2 tonnes de moules, celles-ci représentant jusqu'à 75–80 % de la biomasse épifaunale totale sur les fondations monopieux (Shields et Payne, 2014 ; Wilhelmsson *et al.*, 2006 ; Maar *et al.*, 2009).

Chez les poissons, plusieurs études rapportent une augmentation de l'abondance et de la biomasse à proximité des éoliennes (Figure 9). Des espèces telles que le tacaud (*Trisopterus luscus*) et le cabillaud (*Gadus morhua*) sont explicitement mentionnées. À titre d'exemple, Reubens *et al.* (2011) ont mis en évidence une forte agrégation du tacaud à proximité immédiate d'une éolienne en mer à fondation gravitaire du parc éolien de Thorntonbank, en mer du Nord belge. Dans certains cas, une meilleure condition physique des poissons est observée, ce qui alimente l'hypothèse d'un effet de production plutôt que d'une simple attraction. À titre d'exemple, Buyse *et al.* (2023) ont observé que des poissons échantillonnés à l'intérieur d'un parc éolien en mer présentaient une taille moyenne plus élevée et une proportion plus importante de femelles que ceux capturés dans les zones témoins, et interprètent ces résultats comme un soutien potentiel à l'hypothèse de « production », plutôt qu'à celle d'une simple attraction des poissons vers les structures.

Les effets fonctionnels restent plus rarement documentés. Certaines études montrent des modifications des régimes alimentaires, avec une consommation accrue de proies associées aux substrats durs, confirmée par des approches isotopiques et en acides gras, permettant de retracer l'assimilation de ces proies. Ainsi, Buyse *et al.* (2023) ont démontré que la plie (*Pleuronectes platessa*) adopte, à proximité des turbines, un régime alimentaire fortement dominé par des proies associées aux structures artificielles, telles que l'amphipode *Jassa herdmani*, l'ophiure *Ophiothrix fragilis* et la moule commune *Mytilus edulis*, alors que ces proies sont quasi absentes dans les zones témoins ou de référence. Des résultats similaires ont été rapportés pour le tacaud (Reubens *et al.*, 2011 ; 2013) et pour d'autres espèces démersales (Derweduwen *et al.*, 2016 ; Wilber *et al.*, 2022). Les profils en acides gras analysés par Mavraki *et al.* (2021) confirment par ailleurs une assimilation durable de ces ressources trophiques dans certaines espèces de poisson. Ces résultats suggèrent un enrichissement trophique local.

Les modifications biogéochimiques sont très peu étudiées. Les travaux disponibles mettent en évidence le rôle de la moule commune (*Mytilus edulis*) et de l'amphipode *Jassa herdmani* dans le transport de carbone et la production d'azote, indiquant des effets potentiels sur certains cycles biogéochimiques. Par exemple, Mavraki *et al.* (2022) ont montré qu'au niveau des éoliennes en mer, ainsi que des plateformes pétrolières et gazières du sud de la mer du Nord, les populations de l'amphipode *Jassa herdmani* contribuent à une filtration importante de la colonne d'eau. Cette filtration se traduit par la production de matière organique via leurs fèces, sous forme de pellets fécaux issus de la filtration de particules organiques en suspension, contribuant à l'enrichissement des sédiments sableux environnants et à une modification locale des flux benthopélagiques.

De même, la biomasse élevée de moule commune (*Mytilus edulis*) sur les fondations crée des « points chauds » d'activité biologique, influençant les flux de carbone et d'azote (Maar *et al.*, 2009) et pouvant conduire à une production accrue de protoxyde d'azote (N₂O) via les biofilms microbiens, c'est-à-dire des communautés de bactéries et de micro-organismes associées à une matrice extracellulaire, se développant à la surface des coquilles (Voet *et al.*, 2023).

Quelques études isolées abordent d'autres dimensions fonctionnelles. Janßen *et al.* (2013) ont montré que les fondations d'éoliennes en mer Baltique offrent des surfaces favorables à l'installation de polypes benthiques (stades fixés de cnidaires vivant attachés au substrat), tandis que Krone *et al.* (2017) ont observé une forte abondance de juvéniles de tourteau (*Cancer pagurus*) sur des monopieux équipés d'enrochements, suggérant un rôle potentiel des structures comme habitats de recrutement (c'est-à-dire des milieux favorisant l'installation et la survie des organismes au stade juvénile après leur phase larvaire). Enfin, une étude génétique unique (Luttikhuisen *et al.*, 2019) met en évidence une différenciation génétique marquée chez l'amphipode *Jassa herdmani* entre structures offshore, suggérant l'existence de populations isolées et persistantes associées à ces récifs artificiels.

À une échelle plus intégrative, les effets récifs des éoliennes en mer sur le fonctionnement global des écosystèmes demeurent très peu étudiés. Quelques travaux français, fondés sur des approches de modélisation des réseaux trophiques, suggèrent que l'introduction de structures artificielles pourrait entraîner des modifications du fonctionnement des écosystèmes côtiers, notamment via une redistribution des flux trophiques et une augmentation locale de la biomasse (Raoux *et al.*, 2017, 2019). Ces résultats sont en partie corroborés par une étude *in situ* menée en Chine dans un parc éolien en mer opérationnel, qui met en évidence une augmentation de la biomasse de certains compartiments biologiques, en particulier benthiques et démersaux (Wang *et al.*, 2019a). Bien que reposant sur des contextes géographiques et méthodologiques contrastés, ces travaux convergent vers l'idée que les parcs éoliens en mer peuvent induire une réorganisation du fonctionnement des écosystèmes, tout en soulignant le manque de données d'observation permettant d'évaluer ces effets à l'échelle écosystémique.

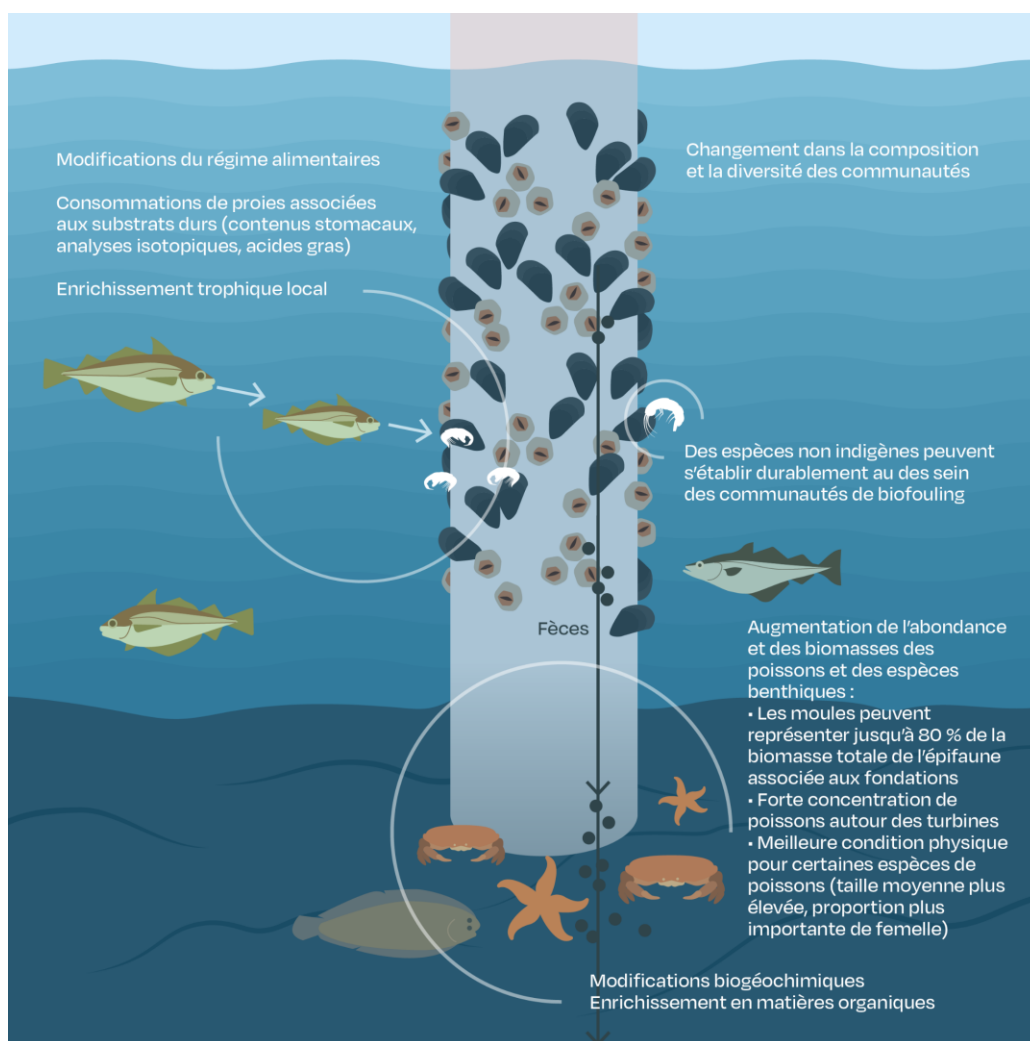


Figure 9. Synthèse des effets documentés liés à l'introduction de substrats durs artificiels par les éoliennes en mer.

4. Incertitudes et lacunes de connaissances

Les connaissances actuelles présentent des incertitudes importantes, tant sur la nature des effets observés que sur leur signification écologique à plus grande échelle, ce qui limite la portée des conclusions pouvant être tirées :

- Les connaissances disponibles sont fortement centrées sur les poissons (45% des études) et les macro-invertébrés benthiques (41%), ce qui limite la compréhension des réponses d'autres compartiments biologiques ;
- Les effets fonctionnels (reproduction, connectivité, fonctionnement global des écosystèmes) restent peu documentés par rapport aux effets structurels ;
- Les comparaisons avec des récifs naturels ou d'autres infrastructures artificielles (épaves, plateformes, aquaculture) sont rares, réduisant la mise en perspective des résultats ;
- La controverse entre effet d'attraction (concentration d'organismes sans augmentation de la production globale) et effet de production (augmentation effective de la production biologique) demeure à ce stade non tranché. Les résultats disponibles montrent une augmentation locale de l'abondance et de la biomasse, mais ne permettent pas de conclure de manière robuste à une augmentation nette de la production biologique à l'échelle des populations ou des écosystèmes. Cependant, un ensemble de travaux portant sur la caractérisation des régimes alimentaires d'espèces variées, notamment via l'analyse des contenus stomacaux et des isotopes stables, montre que la faune associée à l'effet récif est consommée par plusieurs espèces de poissons (Reubens *et al.*, 2011, 2013 ; Derweduwen *et al.*, 2016 ; Mavraki *et al.*, 2021 ; Wilber *et al.*, 2022 ; Buyse *et al.*, 2023). Plus récemment, l'intégration de ces approches avec la modélisation des réseaux trophiques a également contribué à étayer l'hypothèse d'une production locale (De Borger *et al.*, 2025).

MESSAGES-CLÉS

Les éoliennes en mer introduisent des habitats artificiels qui jouent un rôle de récifs, favorisant localement l'installation et le développement de communautés marines. Trois acquis majeurs émergent clairement du corpus scientifique :

- Premièrement, une colonisation benthique rapide et massive des fondations est observée, dominée par des organismes sessiles (fixés) filtreurs tels que la moule commune (*Mytilus edulis*), l'amphipode tubicole *Jassa herdmani*, ainsi que d'autres macro-invertébrés benthiques. Cette colonisation entraîne une augmentation forte et durable de la biomasse et modifie profondément la composition des communautés benthiques locales, par rapport aux habitats environnants ;
- Deuxièmement, de nombreuses études rapportent une augmentation locale de l'abondance et de la biomasse des poissons, en particulier pour certaines espèces démersales et benthopélagiques comme le tacaud (*Trisopterus luscus*) et le cabillaud (*Gadus morhua*). Des améliorations de la condition physique (taille, poids) ont également été observées dans certains cas, suggérant l'existence possible d'un effet de production au moins partiel, et non d'une simple redistribution spatiale ;
- Troisièmement, les éoliennes modifient les interactions trophiques locales. Les analyses isotopiques et en acides gras montrent que les ressources issues des substrats durs artificiels sont intégrées aux réseaux alimentaires, entraînant des transferts de carbone et d'azote associés à l'activité des communautés fixées. Ces résultats indiquent une restructuration fonctionnelle des réseaux trophiques à l'échelle locale.

Dans l'ensemble, les structures d'éoliennes en mer introduisent de nouveaux habitats artificiels, augmentent localement la biomasse et reconfigurent les communautés benthiques et halieutiques, avec des effets particulièrement bien documentés pour les macro-invertébrés benthiques et les poissons.

Cependant, plusieurs points clés restent discutés ou insuffisamment documentés :

- La controverse entre attraction et production demeure centrale. Si l'augmentation locale de l'abondance et de la biomasse est largement établie, certaines études suggèrent un simple effet d'attraction,

correspondant à une concentration d'individus préexistants, tandis que d'autres mettent en évidence des gains de production réelle via un changement d'alimentation, une croissance accrue ou une survie améliorée. Ces deux processus coexistent probablement, mais leur importance relative dépend de nombreux facteurs, notamment l'espèce considérée, le design des structures, l'âge du parc et la pression de pêche locale. À ce stade, aucune conclusion généralisable ne peut être formulée ;

- Par ailleurs, la connaissance des fonctions écosystémiques reste partielle. Les effets sur la reproduction, la connectivité génétique, le fonctionnement global de l'écosystème ou les cycles biogéochimiques sont encore très peu documentés et reposent sur un nombre limité d'études ;
- La dynamique temporelle des effets récifaux demeure également mal comprise. Les communautés semblent suivre des trajectoires de succession, et les « *hotspots* » benthiques observés pourraient être transitoires, avec une évolution des effets au cours du temps.

3. Modification des habitats benthiques

1. Description de la pression et hypothèses d'effets

Un habitat benthique est constitué d'un biotope, espace dont les caractéristiques physiques et chimiques sont relativement stables (composante abiotique), et d'une biocénose composée d'espèces (flore, faune, micro-organismes) vivant dans ou sur le fond marin (composante biotique). Les peuplements benthodémersaux entretiennent des interactions étroites avec cet habitat, notamment pour leur alimentation, et peuvent donc être affectés par toute perturbation de ses différentes composantes. Le développement des parcs éoliens en mer induit, à cet égard, des modifications physiques et biogéochimiques du fond marin susceptibles d'affecter les habitats benthiques ainsi que les peuplements benthodémersaux qui leur sont associés.

La modification des habitats benthiques résulte d'une combinaison de processus liés à l'implantation des infrastructures et à leur présence durable dans le milieu marin (Figure 10). Les principales pressions identifiées incluent la perte directe d'habitats meubles et/ou la perturbation d'habitats rocheux au droit des fondations et des structures associées, les perturbations hydrodynamiques locales dues à la modification des écoulements par la présence des turbines (effets de sillage, correspondant à des zones de turbulence et de ralentissement des courants en aval des structures, et phénomènes d'affouillement au pied des fondations, c'est-à-dire le creusement localisé des fonds marins autour des structures sous l'action des courants et de la houle), ainsi que des perturbations à des échelles plus larges, telles que la modification de la propagation des houles. S'y ajoutent la remise en suspension, le transport et le dépôt de sédiments observés lors des phases de travaux et d'exploitation.

Ces processus peuvent entraîner des modifications des caractéristiques sédimentaires, notamment en matière de granulométrie, de composition minéralogique et biogéochimique, incluant un affinement des sédiments, des variations du contenu en matière organique et en carbonates (notamment liées aux débris coquilliers issus des organismes colonisant les structures), ainsi que des phénomènes de piégeage ou de relargage de polluants.

Cadre analytique – Synthèse des effets potentiels associés aux modifications physiques et biogéochimiques induites par les éoliennes en mer sur les habitats benthiques (Figure 10)

- Des pertes ou perturbations physiques directes au droit des fondations et des structures associées (câbles, etc.) ;
- Des perturbations physiques des habitats liés à la remise en suspension des sédiments (en phase travaux notamment) ;
- Des modifications de l'abondance, de la distribution et de la composition spécifique des communautés benthiques et benthodémersales ;
- Des changements dans les traits de vie (c'est-à-dire les traits fonctionnels) des organismes (nutrition, mobilité, mortalité, morphologie) ;
- Des altérations du fonctionnement des écosystèmes benthiques, notamment via les interactions trophiques et les cycles biogéochimiques.

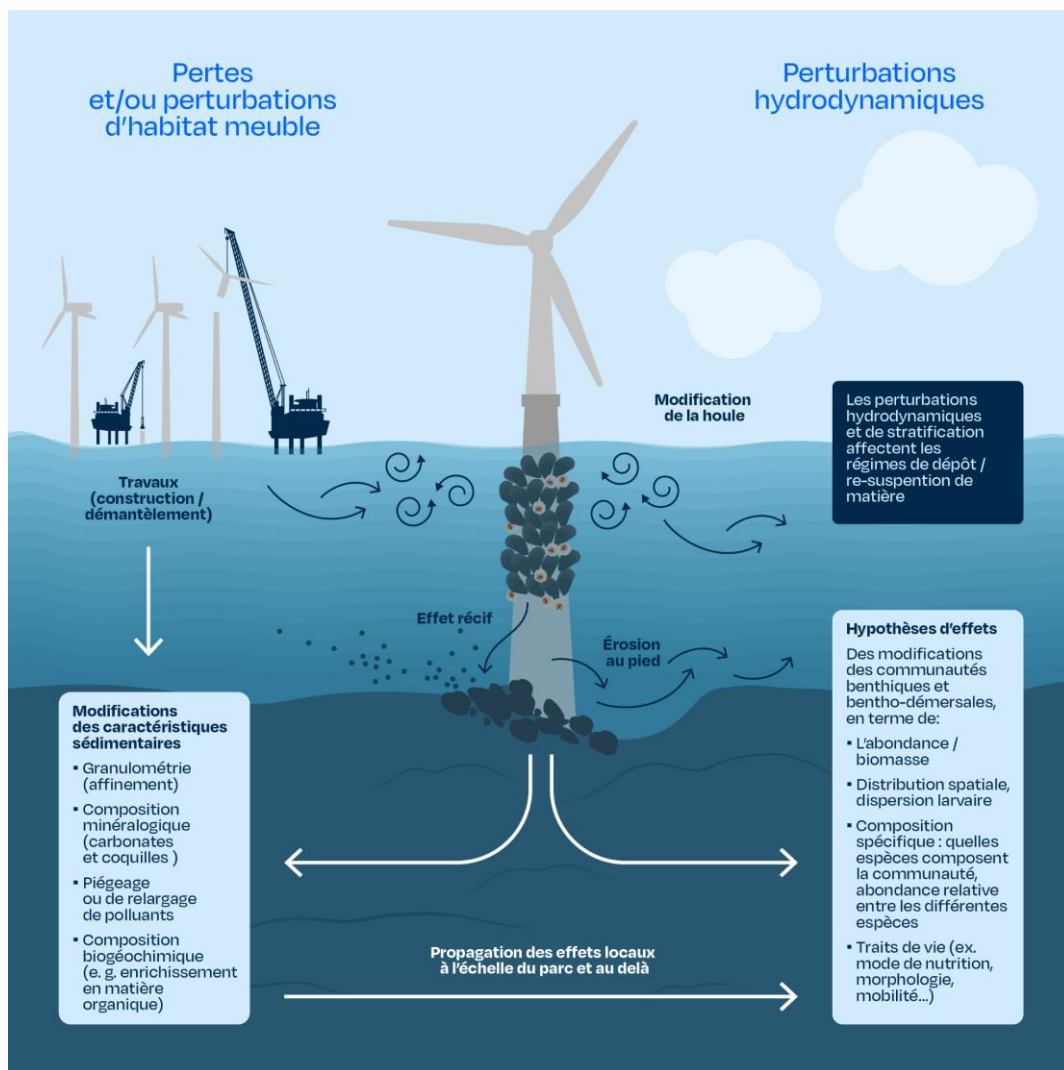


Figure 10. Synthèse des effets potentiels associés aux modifications du milieu induites par les éoliennes en mer sur les habitats benthiques et benthodémersaux environnants les structures.

2. Description du corpus de la revue systématique

Le corpus analysé comprend 28 articles, correspondant à 161 études. Plus de la moitié de ces publications ont été publiées après 2015, et une dizaine après 2020, traduisant un champ de recherche relativement récent.

Les études sont majoritairement conduites dans des contextes caractérisés par une faible profondeur (inférieure à 40 m), sur des fonds sableux (fins à grossiers) et/ou vaseux. Les fonds très grossiers (gravier/blocs) ou rocheux sont peu représentés (7 articles).

Les approches méthodologiques mobilisées sont principalement :

- Des études *in situ* avec comparateurs spatiaux et/ou temporels (21 articles) ;
- Des approches de modélisation (5 articles).

Les articles portent essentiellement sur la phase d'exploitation des parcs. Aucun article ne traite spécifiquement des effets du démantèlement. Les analyses sont majoritairement menées à une échelle spatiale locale (turbine, parfois parc) et sur des échelles temporelles courtes à moyennes (inférieures à 5 ans), aucune étude ne dépassant 8 ans de suivi. Un seul article s'intéresse à la technologie flottante, selon une approche de modélisation, et en s'intéressant notamment aux effets induits par le co-usage (aquaculture).

Les travaux ciblent soit des groupes taxonomiques spécifiques, soit les communautés benthiques ou benthodémersales dans leur ensemble. Un nombre plus limité d'études porte sur les propriétés abiotiques de l'habitat.

3. État des connaissances – Ce que dit la science

Les résultats disponibles montrent que les éoliennes en mer entraînent des modifications mesurables des habitats benthiques et des peuplements benthodémersaux, bien que l'ampleur et la nature de ces effets varient selon les contextes environnementaux et les espèces considérées (Figure 11).

Les études ciblant des groupes taxonomiques spécifiques montrent majoritairement une absence d'effet significatif détectable sur les traits de vie (28 sur 41 études abordant les traits de vie) des espèces étudiées (reproduction, physiologie, régime alimentaire, mobilité). Lorsque des réponses sont observées sur les paramètres quantitatifs (abondance, densité, biomasse), celles-ci sont variables selon les espèces, avec une stabilité ou une augmentation plus fréquemment rapportée (45/54 études) qu'une diminution (3/54 études).

À l'échelle des communautés benthiques, les travaux mettent en évidence des modifications de la structure communautaire, se traduisant souvent par une stabilité ou une augmentation de la diversité spécifique (11/15 études) ou un effet mixte ou non quantifiable (3/15 études). Les indicateurs quantitatifs de communauté correspondent fréquemment à un effet stable ou à une augmentation (14/25 études), ou à un effet mixte ou non quantifiable (7/25 études) ; cette variabilité observée à l'échelle des communautés reflète des réponses différenciées selon les espèces qui les composent, rendant les tendances globales parfois complexes à interpréter.

Les effets abiotiques les plus fréquemment décrits concernent : les changements de nature de substrat, l'affinement des sédiments, et l'augmentation du contenu en matière organique des sédiments (rapportée par 5/8 études portant sur ce paramètre abiotique).

Les effets observés semblent généralement circonscrits à proximité immédiate des turbines, en particulier dans les études adoptant des approches de type « Before/After Gradient » (BAG, méthode de comparaison des observations avant/après implantation selon un gradient de distance aux turbines). En revanche, les effets potentiels à des distances plus larges restent encore peu documentés. Par exemple, en Belgique, sur un site équipé de fondations de type gravitaire, Coates *et al.* (2014), à l'aide d'une approche BAG, ont mis en évidence des modifications de l'habitat physique ainsi que des communautés benthiques associées. Dans un rayon de 100 à 200 m autour des turbines, une diminution de la granulométrie des sédiments a été observée, tandis que la teneur en matière organique augmentait. Ces modifications des caractéristiques abiotiques s'accompagnaient d'une augmentation marquée de la densité de la macrofaune benthique, ainsi que d'une hausse de la diversité spécifique (augmentation du nombre d'espèces présentes). Par ailleurs, une modification dans la dominance des espèces a été mise en évidence, avec une prédominance accrue du ver tubicole des sables (*Lanice conchilega*) à proximité des fondations, espèce caractéristique des substrats sableux à vaseux et reconnue pour son rôle d'espèce ingénieure de l'écosystème, en raison de sa capacité à modifier localement les caractéristiques physiques du milieu benthique et à influencer les conditions d'installation d'autres espèces.

Les effets observés résultent généralement d'une combinaison de pressions imbriquées, qu'il est difficile de distinguer ou de hiérarchiser. En particulier, il demeure complexe de dissocier les effets liés à la modification des habitats meubles de ceux associés à l'introduction de substrats durs et leur colonisation (effet récif). D'autres pressions concomitantes sont également mentionnées, telles que la réduction de la pression de pêche au sein des parcs ou les effets d'activités colocalisées, comme l'aquaculture.

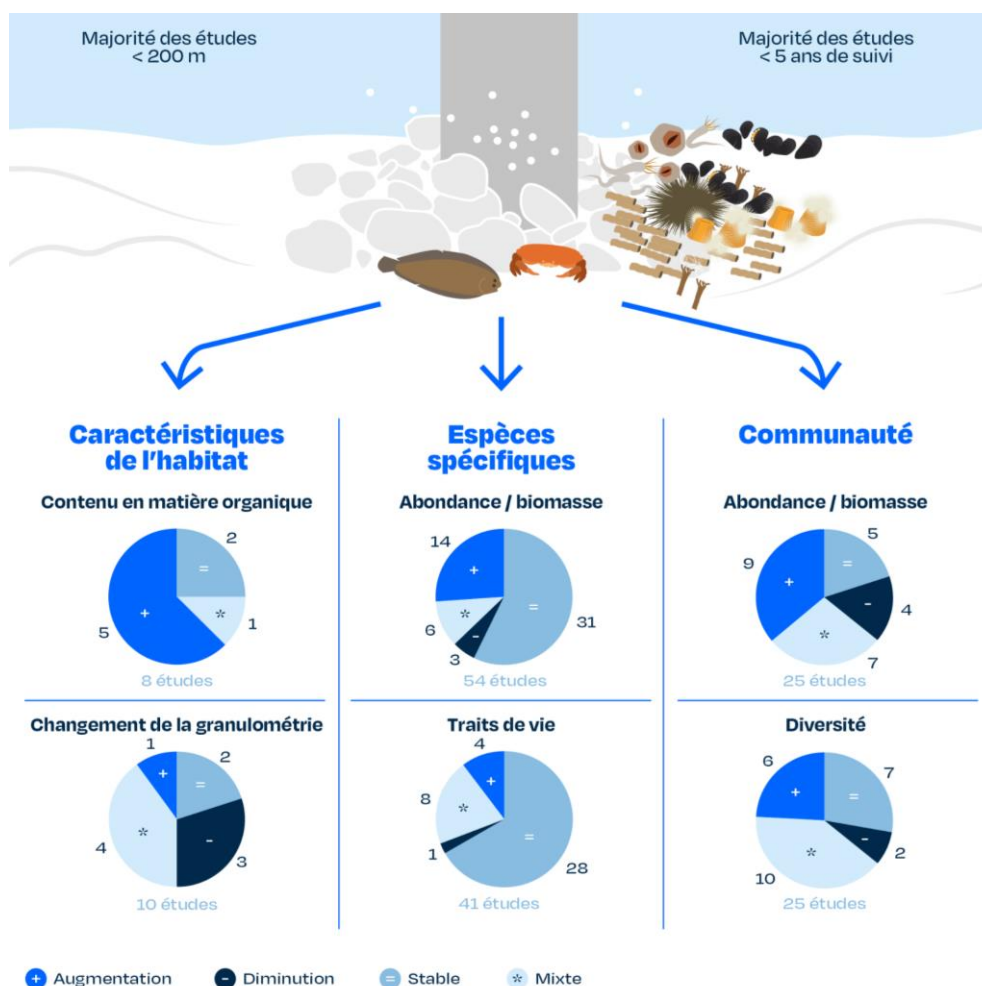


Figure 11. Synthèse des effets documentés liés aux modifications du milieu induites par les éoliennes en mer sur les habitats benthiques et bentho-démersaux environnants les structures.

4. Incertitudes et lacunes de connaissances

Les incertitudes identifiées sont étroitement liées aux limites méthodologiques des études disponibles. Les suivis sont généralement réalisés à des échelles spatiales locales (turbine ou parc) et avec des fréquences d'échantillonnage faibles, souvent annuelles. De plus, le nombre limité d'échantillons rend difficile la distinction entre la variabilité naturelle et les effets induits.

Les approches de modélisation permettent d'aborder des échelles spatio-temporelles plus larges, mais restent limitées par :

- Une simplification des processus considérés (par exemple absence de couplage houle/courant pour les modèles hydrodynamiques) et/ou leur limitation (par exemple absence de prise en compte des processus à l'interface eau-sédiments, pas ou peu de couplage biologie/processus physiques) ;
- Un manque de données *in situ* pour la calibration et la validation (cf. discussion présentée par Pezy *et al.* (2020) concernant l'apport des données *in situ* dans le processus de modélisation écosystémique).

Par ailleurs, ces limites méthodologiques se traduisent également par une couverture encore partielle des contextes environnementaux étudiés, certains types d'habitats (tels que les fonds rocheux, la plateforme externe ou le haut de pente) demeurant encore peu documentés.

Enfin, bien qu'aucune controverse *stricto sensu* n'ait été identifiée, l'augmentation des indices de diversité des communautés benthiques est fréquemment interprétée comme un effet « positif », sans que sa contribution effective au fonctionnement des écosystèmes ou à l'atteinte des objectifs de gestion ne soit réellement discutée.

5. Contextualisation des résultats à partir de la littérature complémentaire

La littérature complémentaire mobilisée pour contextualiser ces résultats concerne :

- Des publications sur les effets des parcs éoliens sur les compartiments abiotiques d'intérêt : 51 articles ont été identifiés, dont la majorité porte sur l'hydrodynamique et le transport sédimentaire (32). Neuf articles traitent de méthodes d'évaluation *a priori* des effets cumulés ou du risque écologique dans un objectif de planification, et trois de méthodes de caractérisation de l'état initial ou de suivi. Les autres abordent les effets induits par la mise en place des fondations ou l'ancrage des éoliennes flottantes, ainsi que des modifications de la morphologie des fonds marins ou du trait de côte.
- Des publications sur les effets induits par une modification du compartiment abiotique sur les biocénoses benthiques : 861 articles ont été identifiés. Plus de la moitié de ces travaux (433) décrit des effets associés à d'autres activités anthropiques (structures offshore, extraction de granulats, pêche, aquaculture) générant des pressions analogues sur les habitats benthiques, sans être nécessairement comparables en matière d'intensité ou d'étendue spatiale. Par ailleurs, 133 articles ont été retenus bien qu'ils portent sur des pressions non ciblées mais pertinentes dans une logique de cumul d'effets (eutrophisation, qualité de l'eau, taux d'oxygène, salinité, etc.). Les autres travaux analysent principalement les effets des changements hydrosédimentaires, de la qualité chimique des sédiments, de la turbidité ou de la sédimentation sur les biocénoses benthiques.
- Des articles scientifiques et de synthèse, ainsi que des rapports institutionnels : 39 références supplémentaires ont été consultées afin d'étayer la description des pressions, des effets potentiels et l'évaluation de la sensibilité des espèces.

Ces travaux permettent d'identifier une littérature plus large susceptible d'étoffer les résultats spécifiques à l'éolien en mer, en les replaçant dans un cadre plus général de modifications des habitats benthiques sous contraintes anthropiques. Ils permettent également de s'assurer qu'aucun effet potentiel, documenté dans la littérature et susceptible d'avoir une incidence sur les habitats benthiques environnants les structures, n'a été omis dans le cadre de cette expertise. Enfin, ils mettent en évidence des effets distants sur le compartiment abiotique, notamment sur les conditions hydrodynamiques et la dynamique sédimentaire, susceptibles d'avoir des répercussions à plus large échelle sur les habitats benthiques (augmentation de la mobilité sédimentaire induisant davantage de perturbations, diminution des conditions hydrodynamiques permettant la sédimentation de particules plus fines, etc.).

MESSAGES-CLÉS

- L'implantation des éoliennes en mer entraîne des modifications physiques locales des habitats benthiques, principalement liées à l'installation des fondations, aux dispositifs de protection contre l'affouillement, aux perturbations initiales des sédiments et à la colonisation des structures (effet récif) ;
- Les études disponibles mettent en évidence des changements de la composition et de la structure des peuplements benthiques ainsi que des poissons benthiques et benthodémersaux à proximité des structures, avec une tendance à l'augmentation locale de la diversité et/ou de la biomasse de certaines espèces, voire de la communauté dans son ensemble ;
- Ces modifications sont généralement circonscrites à l'échelle du parc ou à la proximité immédiate des structures, sans démonstration claire d'effets s'étendant à de plus larges échelles spatiales pour les durées d'observation considérées (le plus souvent inférieures à 5 ans) ;

- Les effets à moyen et long terme, notamment l'évolution des habitats au cours du temps et les trajectoires écologiques associées, demeurent insuffisamment documentés ;
- La transposabilité aux eaux françaises doit prendre en compte la diversité des habitats benthiques, les spécificités biogéographiques ainsi que les choix techniques (par exemple le type de fondations) ;
- La couverture limitée du corpus étudié en matière de conditions environnementales restreint la généralisation des résultats. En effet, les réponses des communautés benthiques sont susceptibles de varier fortement selon la nature des fonds marins, les paramètres environnementaux, leur sensibilité (capacité de résistance et de résilience) ainsi que l'état écologique initial des communautés.

4. Modification des habitats pélagiques

1. Description des pressions et hypothèses d'effets

Les éoliennes en mer peuvent exercer des pressions sur la biodiversité pélagique, c'est-à-dire sur la diversité des organismes évoluant dans la colonne d'eau marine (des producteurs primaires microscopiques jusqu'aux grands prédateurs mobiles), par opposition aux organismes benthiques vivant sur le fond marin et/ou fixés aux substrats. Ces pressions s'exercent principalement via des modifications des paramètres physiques du milieu marin (en particulier la turbulence et le mélange vertical) et par l'introduction de substrats durs artificiels colonisés par des organismes benthiques (phénomène de biocolonisation, cf. section « Introduction de substrats durs artificiels »), susceptibles d'interagir avec les organismes pélagiques. Elles peuvent se manifester à différentes échelles spatiales, depuis l'environnement immédiat d'une éolienne jusqu'à l'échelle du parc, voire de groupes de parcs.

Les pressions physiques identifiées concernent les modifications de l'hydrodynamisme, caractérisées par une augmentation de la turbulence, un renforcement du mélange vertical, une altération de la stratification de la colonne d'eau, ainsi que la formation de panaches turbides dans le sillage des fondations. Ces processus sont susceptibles de disperser les communautés planctoniques, de modifier la disponibilité des nutriments et la distribution de l'éclairement sous-marin, avec des effets potentiellement antagonistes sur les communautés planctoniques : en période d'été, quand la stratification thermique est développée, le mélange vertical induit par les éoliennes pourrait favoriser un apport d'éléments nutritifs depuis le fond vers la couche de surface et stimuler la croissance du phytoplancton de manière localisée, tandis que les panaches turbides pourraient au contraire limiter la photosynthèse. En complément des pressions associées aux fondations des éoliennes posées, les éoliennes flottantes, en tant qu'obstacles à l'écoulement marin (courants de marée ou courants côtiers intenses sur le plateau continental), sont susceptibles de générer des ondes internes lorsque la profondeur de leurs supports est comparable à celle de la couche de surface stratifiée. Ces ondes peuvent renforcer le mélange vertical, parfois à grande distance en aval des éoliennes.

Par ailleurs, les structures immergées des éoliennes constituent des substrats favorables à la colonisation par des organismes benthiques filtreurs, tels que les moules, qui se nourrissent en filtrant les particules organiques en suspension dans la colonne d'eau. Ce phénomène de biofiltration est susceptible d'entraîner une diminution des concentrations en phyto- et zooplancton à proximité des éoliennes. De telles modifications des communautés planctoniques pourraient, à leur tour, influencer les organismes pélagiques des niveaux trophiques supérieurs, notamment les poissons, les mammifères marins et les invertébrés pélagiques.

Cadre analytique – Synthèse des effets potentiels associés aux modifications du milieu induites par les éoliennes en mer sur les habitats pélagiques (Figure 12)

- Une dispersion horizontale et verticale du phytoplancton et du zooplancton (effet A) ;
- Une augmentation locale de la concentration en phytoplancton, liée aux apports d'éléments nutritifs vers la couche de surface par effet de mélange vertical ou d'upwelling (c'est-à-dire la remontée vers la surface des eaux profondes) (effet B) ;
- Une limitation de la photosynthèse du phytoplancton, causée par la présence éventuelle de panaches turbides (effet C) ;
- Une diminution locale de la concentration en plancton au voisinage des surfaces immergées des structures d'éoliennes, en lien avec un effet indirect de biofiltration exercé par les organismes benthiques filtreurs — notamment les moules — qui colonisent ces substrats (effet D).
- Des modifications structurelles de la biodiversité pélagique, en lien avec la biocolonisation des structures et l'effet récif, sont également susceptibles de se produire : elles sont décrites dans la section dédiée à l'introduction de substrats durs artificiels.

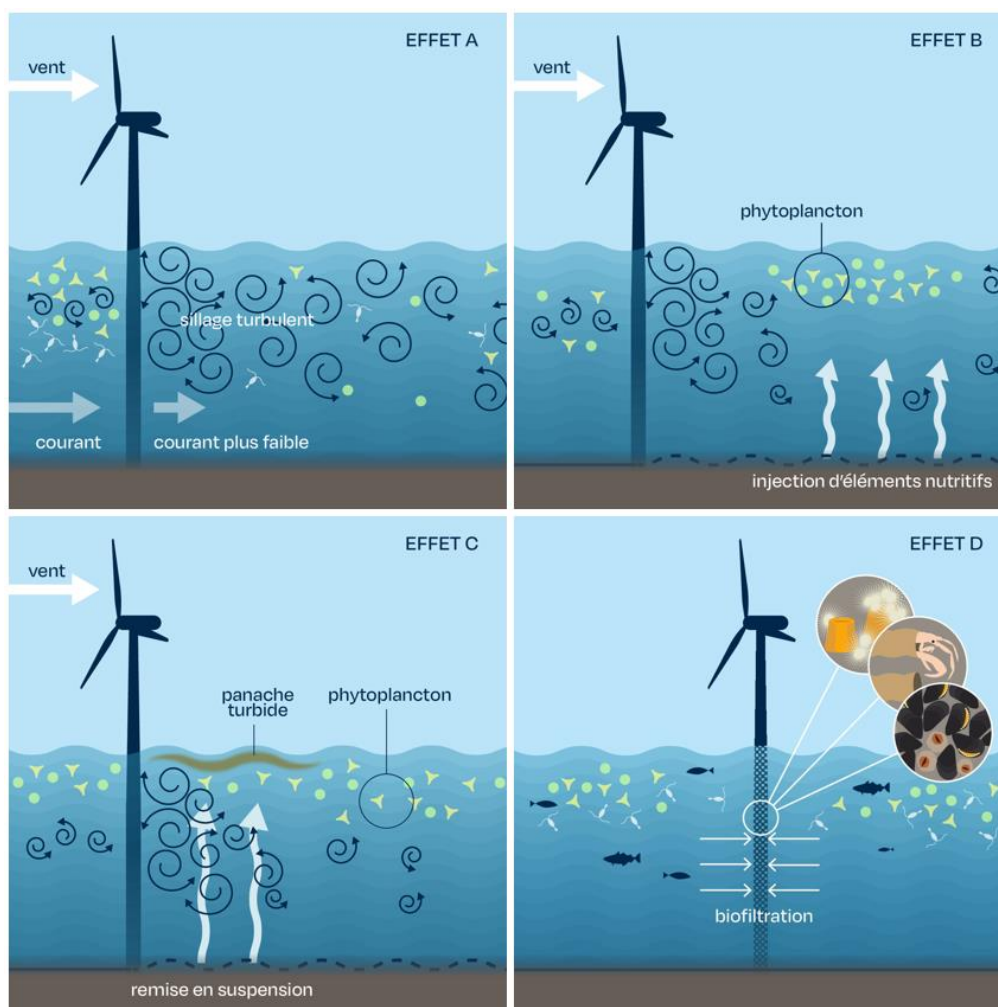


Figure 12. Synthèse des effets potentiels associés aux modifications du milieu induites par les éoliennes en mer sur les habitats pélagiques.

2. Description du corpus de la revue systématique

Le corpus scientifique mobilisé comprend 40 études issues de 27 articles publiés entre 2007 et 2024, avec une forte augmentation du nombre de publications à partir de 2018, qui représente environ 68 % des articles.

Les études sont majoritairement localisées dans les mers du plateau nord-ouest européen, en particulier en mer du Nord, Manche et mer Baltique, ainsi qu'en mer de Chine. Une seule étude est recensée en mer Méditerranée et une autre de l'autre côté de l'Atlantique, aux États-Unis.

Les travaux reposent sur des approches variées, incluant :

- Des études de modélisation (19 études) ;
- Des approches observationnelles *in situ* (28 études) ;
- Des analyses par télédétection (3 études).

Les études concernent principalement la phase d'exploitation des parcs (30 études), tandis que les phases de pré-construction et de construction sont moins documentées (10 études).

Les principaux groupes biologiques étudiés sont le phytoplancton (13 études), le zooplancton (9 études) et les poissons (12 études).

3. État des connaissances – Ce que dit la science

Les effets des parcs éoliens en mer sur la biodiversité pélagique restent inégalement documentés. Les mécanismes les mieux décrits concernent la biocolonisation, associée à l'introduction de substrats durs artificiels, ainsi que l'effet réserve (Figure 13).

Les résultats indiquent que la biocolonisation des fondations par des invertébrés benthiques filtreurs peut entraîner une diminution locale des concentrations de phytoplancton et de zooplancton, par des processus de biofiltration, comparables à ceux observés à proximité des parcs conchylicoles. Un exemple fréquemment cité est celui de la moule commune (*Mytilus edulis*), principal organisme benthique filtreur colonisant les structures immergées des éoliennes en mer du Nord. Il a été estimé par modélisation que la biofiltration exercée par cette espèce entraîne une diminution moyenne annuelle en chlorophylle-a d'environ 20 % dans un rayon de 20 m autour des fondations (Maar *et al.*, 2009). Parallèlement, plusieurs études montrent une augmentation de l'abondance de poissons pélagiques, en lien avec l'effet récif et l'effet réserve associés aux structures éoliennes. Cet effet, qui est l'un des plus fréquemment documentés dans la littérature (Andersson *et al.*, 2010, Buyse *et al.*, 2023 ; Wilber *et al.*, 2022), est détaillé dans la partie dédiée à l'introduction de substrats durs artificiels. Par ailleurs, les articles sur l'effet récif mettent en évidence une augmentation de l'abondance et de la biomasse des poissons à proximité des éoliennes, en particulier pour certaines espèces démersales et benthopélagiques, telles que le tacaud (*Trisopterus luscus*) et le cabillaud (*Gadus morhua*).

Les études disponibles montrent également que les parcs éoliens en mer modifient plusieurs paramètres physiques de l'environnement marin, notamment la turbulence, le mélange vertical et la stratification de la colonne d'eau. En revanche, les effets de ces modifications sur la biodiversité pélagique demeurent plus incertains (Figure 13). Concernant la stratification, des observations *in situ* et des simulations numériques mettent en évidence un mélange des eaux stratifiées induit par les fondations, susceptible de favoriser des apports de nutriments vers la couche de surface (Floeter *et al.*, 2017). En mer du Nord, des simulations numériques montrent que ces apports peuvent stimuler la production primaire (activité photosynthétique du phytoplancton), entraînant une augmentation hétérogène des concentrations de phytoplancton, notamment au sein et en bordure des parcs (Daewel *et al.*, 2022).

Les panaches turbides, parfois observés dans le sillage des éoliennes, pourraient limiter l'éclairement disponible pour la photosynthèse. Les effets sur la production primaire demeurent toutefois difficiles à quantifier et n'ont pas été analysés dans les publications du corpus.

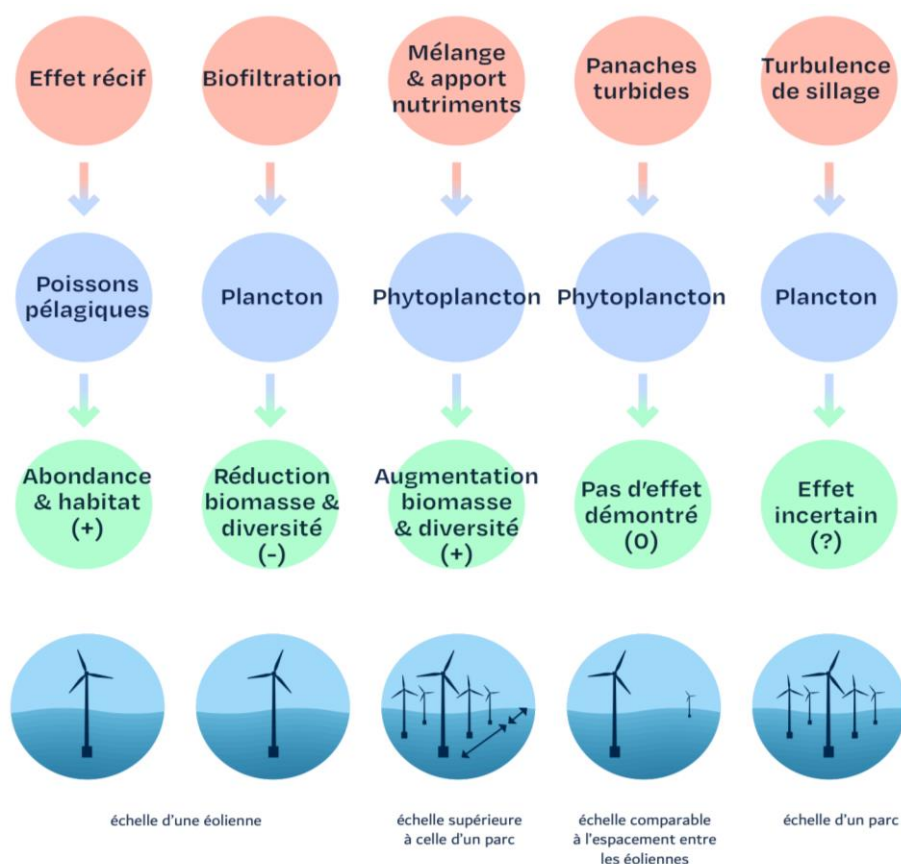


Figure 13. Synthèse des effets documentés des modifications du milieu induites par les éoliennes en mer sur la biodiversité pélagique et des échelles spatiales auxquelles ces effets sont observés.

4. Incertitudes et lacunes de connaissances

Les résultats disponibles restent marqués par des lacunes importantes, liées à la diversité des contextes étudiés et à la difficulté d'isoler les effets propres aux éoliennes en mer :

- Les effets de la turbulence de sillage sur la dispersion et l'agrégation du phytoplancton et du zooplancton ne sont pas démontrés dans les études directement associées aux parcs éoliens ;
- Les données d'observation *in situ* restent limitées, en particulier pour des analyses robustes basées sur la comparaison avant/après des sites éoliens en parallèle de sites de référence, ce qui complique la distinction entre effets des parcs et variabilité naturelle ;
- Les effets confondants entre les diverses pressions physiques (modification stratification, apports d'éléments nutritifs, augmentation de la turbidité) et les pressions biologiques (biofiltration, effet récif) restent difficiles à isoler et à quantifier.

5. Contextualisation des résultats à partir de la littérature complémentaire

L'analyse de publications scientifiques publiées après mars 2024, c'est-à-dire ultérieurement au corpus analysé dans le cadre de la revue systématique, ainsi que de la littérature complémentaire portant sur l'effet de pressions analogues (soit un total de 25 publications), permet de mettre en perspective les résultats observés sur les parcs éoliens en mer, dans un contexte où les données directement issues de ces parcs restent très limitées.

Les connaissances relatives aux effets de la turbulence induite par le vent sur le mélange vertical du plancton reposent sur des études analogues menées en milieu marin naturel, sans infrastructures éoliennes (Barrillon *et al.*, 2023). Ces travaux montrent que des niveaux de turbulence comparables peuvent modifier la distribution verticale du phytoplancton, mais ne permettent pas de transposer directement ces résultats aux parcs éoliens en mer.

En mer du Nord, l'existence de panaches turbides dans le sillage des éoliennes est bien documentée (Vanhellemont et Ruddick, 2014). Pour des éoliennes installées sur des fonds sableux, l'augmentation moyenne de la concentration en matière en suspension dans les panaches turbides est de l'ordre de 4 à 12%, entraînant une réduction d'environ 5% de l'éclairement sous-marin disponible pour la photosynthèse (Lecordier *et al.*, 2025). L'effet sur le phytoplancton, non abordé dans ces publications complémentaires, reste cependant à évaluer.

Des analogues issus de l'aquaculture de bivalves (huîtres et moules) illustrent également les effets de la biofiltration sur la diminution de la concentration en phytoplancton (Cranford *et al.*, 2008), apportant des éléments de mise en perspective sans permettre une transposition quantitative directe. En outre, la biofiltration engendre également des effets indirects où l'excrétion d'ammonium par les bivalves augmente la quantité d'éléments nutritifs disponibles pour le phytoplancton (Filgueira *et al.*, 2016).

MESSAGES-CLÉS

Les éoliennes en mer affectent la biodiversité pélagique en modifiant certains paramètres physiques du milieu (turbulence, stratification de la colonne d'eau, éclairement sous-marin), ce qui entraîne des changements dans la distribution spatiale et temporelle du phytoplancton et du zooplancton, avec des répercussions sur les espèces pélagiques des niveaux trophiques supérieurs. À cela s'ajoutent les effets liés à la biocolonisation des structures immergées. Les principales conclusions sont résumées ci-dessous :

- L'effet récif, et dans une moindre mesure l'effet réserve, est le résultat le plus fréquemment documenté, avec une augmentation de l'abondance de poissons pélagiques à proximité des parcs ;
- La biofiltration par les invertébrés benthiques colonisant les fondations est associée à une diminution locale de la concentration en phytoplancton ;
- Les modifications de la stratification par effet de mélange vertical ou d'« *upwelling* » (remontée vers la surface des eaux profondes) peuvent favoriser des apports nutritifs et stimuler localement la production primaire, mais ces effets sont hétérogènes et difficiles à quantifier ;
- Les effets liés à la turbulence de sillage sur la dispersion du phyto- et du zooplancton, ainsi que les effets associés aux panaches turbides, restent incertains et insuffisamment documentés.

Les lacunes de données, le manque de suivis à long terme et l'hétérogénéité des méthodes limitent la capacité à évaluer les effets cumulés et à distinguer les effets des parcs de la variabilité naturelle.

5. Émissions de substances chimiques

1. Description de la pression et hypothèses d'effets

Le développement et l'exploitation des parcs éoliens en mer peuvent s'accompagner d'émissions de substances chimiques dans le milieu marin, constituant une pression potentielle sur la biodiversité. Ces rejets sont principalement associés aux matériaux constitutifs des structures (aciers, bétons, matériaux composites, etc.), aux systèmes de protection contre la corrosion (anodes, peintures, etc.), ainsi qu'aux différentes phases du cycle de développement des parcs, incluant les activités de construction (notamment la remise en suspension des sédiments lors de la pose des câbles sous-marins), de maintenance et d'exploitation (structures, turbines), et de démantèlement (Figure 14).

Les principales sources d'émissions chimiques identifiées sont liées aux systèmes de protection cathodique par anodes galvaniques (dites « anodes sacrificielles »), utilisés pour limiter la corrosion des structures métalliques immergées. La dissolution progressive de ces anodes entraîne une diffusion continue d'éléments traces métalliques (ETMs) dans le milieu marin, principalement de l'aluminium, du zinc et de l'indium. À l'inverse, les émissions associées aux systèmes de protection cathodique à courant imposé demeurent peu documentées. Peu d'études se sont intéressées à la libération de composés organiques chlorobromés, résultant de l'oxydation des ions chlorure et bromure présents dans l'eau de mer, par ces systèmes, qui sont de plus en plus utilisés pour protéger les structures éoliennes immergées.

D'autres sources potentielles incluent l'émission de métaux rares issus des aimants, les fuites de lubrifiants et de fluides hydrauliques, ainsi que des débris solides (comme les microplastiques) issus de l'usure ou de la dégradation des équipements. Ces apports peuvent se cumuler avec les rejets liés aux activités maritimes générées par l'installation, la maintenance et le démantèlement des parcs. Ces émissions sont généralement localisées à proximité immédiate des structures, mais peuvent contribuer à une contamination diffuse des sédiments et de la colonne d'eau, en interaction avec d'autres sources d'émissions chimiques présentes en milieu marin (liées aux transports maritimes, aux apports continentaux, etc.).

Cadre analytique – Synthèse des effets potentiels associés aux émissions chimiques induites par les éoliennes en mer (Figure 14)

- Une augmentation locale des concentrations en molécules chimiques dans l'eau et les sédiments (potentiellement amplifiée en cas d'affinement des sédiments à proximité des turbines) ;
- Des phénomènes d'accumulation chez certains organismes exposés (bioaccumulation) ;
- Des effets sublétaux (c'est-à-dire n'entraînant pas directement la mort, mais susceptibles d'altérer le fonctionnement physiologique, biochimique ou comportemental) chez les espèces sensibles ;
- Des modifications des communautés benthiques et microbiennes à proximité des structures.

Ces hypothèses s'appliquent à l'ensemble de la biodiversité marine, plus spécifiquement à celle présente au sein des parcs éoliens, avec des sensibilités variables selon les groupes biologiques, les modes de vie (pélagique, benthique) et les traits d'histoire de vie (stades larvaire, juvénile ou adulte).

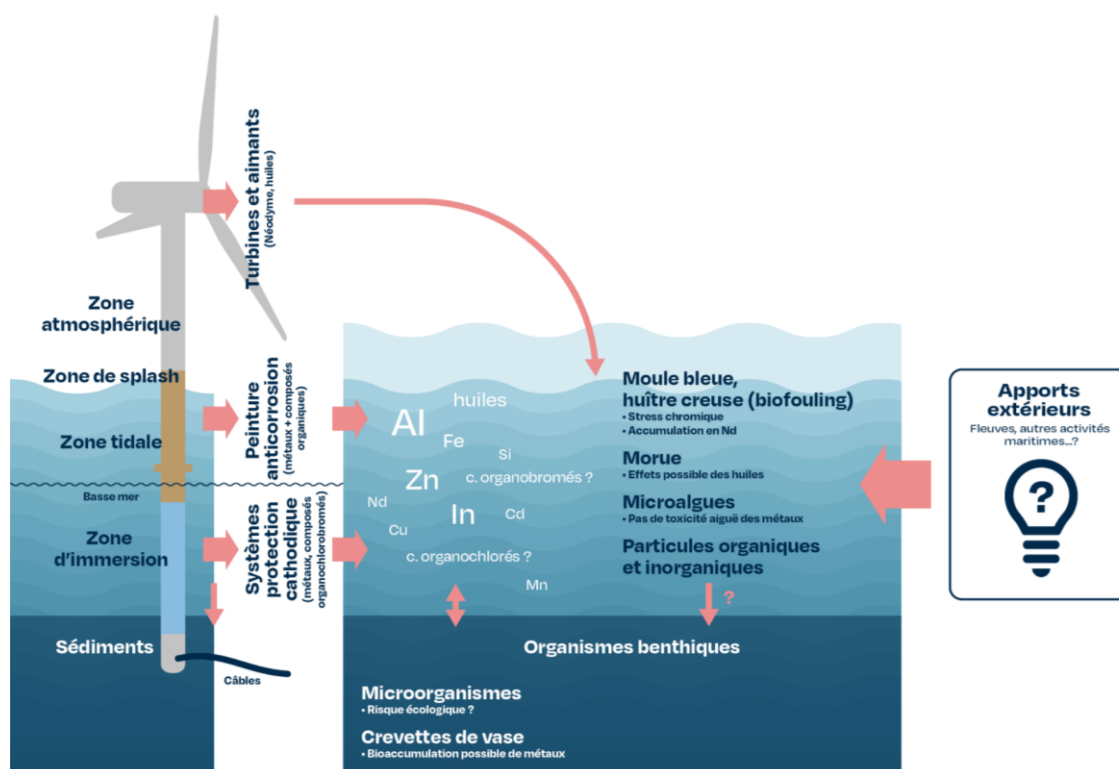


Figure 14. Synthèse des principales sources d'émissions chimiques associées aux différentes phases de développement des parcs éoliens en mer (construction, exploitation et démantèlement). Métaux impliqués : Al (aluminium), Zn (zinc), In (indium), Cd (cadmium), Si (silicium), Fe (fer), Cu (cuivre), Mn (manganèse), Nd (néodyme).

2. Description du corpus de la revue systématique

La littérature scientifique disponible sur les émissions chimiques associées aux éoliennes en mer est quantitativement limitée. Le corpus issu de la revue systématique comprend un nombre restreint de publications scientifiques (7 articles et 9 études), portant essentiellement sur les rejets métalliques liés aux anodes galvaniques et leurs effets potentiels sur l'environnement marin.

Les quelques études recensées ont été menées dans des contextes géographiques variés, notamment en baie de Bohai (mer Jaune), dans le cadre de travaux portant sur les sédiments et les communautés microbiennes, en lien avec les opérations de pose des câbles, ainsi qu'entre la mer du Nord et la mer Baltique pour l'analyse des effets des anodes galvaniques, dans le cadre de suivis environnementaux et d'évaluations du risque (méthode ERA/WoE, pour *Ecological Risk Assessment / Weight of Evidence*).

Les travaux portent principalement sur les phases d'exploitation et de maintenance des parcs, en lien avec les dispositifs de protection contre la corrosion. Les phases de construction et d'exploitation sont généralement abordées de manière indirecte (modélisation), tandis que la phase de démantèlement est absente du corpus analysé. La majorité des études est conduite à des échelles spatiales locales, centrées sur l'environnement immédiat des éoliennes ou de leurs fondations.

Les études disponibles concernent principalement :

- Des mesures de concentrations de métaux dans les sédiments et, plus rarement, dans la colonne d'eau ;
- Des analyses des communautés microbiennes sédimentaires à proximité des structures ;

- Quelques travaux évaluant des effets biologiques sublétaux chez des organismes benthiques (biofouling / encrassement biologique et sédimentaire) ou des effets aigus (simulant un déversement accidentel de composés chimiques) sur quelques espèces pélagiques (microalgues, diatomées et poissons).

Les approches méthodologiques reposent principalement sur :

- Des analyses chimiques des sédiments (calculs d'indices de pollution) et des tissus biologiques ;
- Des observations *in situ* de communautés microbiennes et benthiques ;
- Des outils de modélisation associés à une analyse de risque fondée sur l'approche ERA/WoE (*Ecological Risk Assessment / Weight of Evidence*) ;
- Des expérimentations en laboratoire visant à évaluer des réponses physiologiques ou biochimiques.

Les indicateurs biologiques étudiés concernent surtout la bioaccumulation, la croissance, la physiologie et la structure des communautés microbiennes. Les organismes cibles incluent des microorganismes et un crustacé copépode associés aux sédiments, ainsi que certains organismes filtreurs fixés, tels que les moules et les huîtres, ou encore des espèces pélagiques comme le cabillaud (*Gadus morhua*) et une microalgue diatomée.

3. État des connaissances – Ce que dit la science

Les résultats disponibles, encore très peu nombreux, suggèrent, lorsqu'ils existent, des effets contrastés des émissions chimiques associées aux éoliennes en mer (Figure 15). Les travaux recensés identifient les systèmes de protection cathodique par anodes galvaniques comme la principale source documentée de rejets chimiques, via la libération d'éléments traces métalliques (principalement l'aluminium, le zinc et l'indium). Les études ne mettent généralement pas en évidence de toxicité aiguë chez les organismes exposés, mais indiquent une tendance à la bioaccumulation de certains métaux. C'est notamment le cas de l'amphipode *Corophium volutator*, chez lequel une accumulation d'éléments traces métalliques (tels que l'aluminium, le zinc ou le cuivre) est observée au niveau de la cuticule (van der Au *et al.*, 2021) ou dans les tissus (Bell *et al.*, 2020).

Deux études menées en Chine rapportent une augmentation locale possible des concentrations métalliques (cuivre, chrome, zinc, cadmium) lors de la remise en suspension des sédiments à proximité des structures, en particulier durant la phase de construction des parcs (Wang *et al.*, 2019b ; Wang *et al.*, 2023b). Les auteurs montrent que cette augmentation des concentrations en éléments traces métalliques (ETMs) peut avoir une influence sur la distribution des communautés bactériennes benthiques présentes dans les sédiments. Ces travaux soulignent toutefois les incertitudes encore importantes quant à la portée écologique de ces observations, d'autant plus que les enrichissements en ETMs peuvent provenir de sources multiples (apports fluviaux, activités portuaires et/ou parcs éoliens).

Chez les organismes benthiques, et notamment les espèces fixées sur les mâts telles que les moules et les huîtres, Wang *et al.* (2023a) mettent en évidence des effets biologiques sublétaux, incluant des altérations de la croissance, de la physiologie et des profils métaboliques (stress oxydatif, perturbations énergétiques, réponses immunitaires), pouvant être mis en relation avec les émissions globales issues d'un parc éolien. Par ailleurs, Freitas *et al.* (2020) rapportent, lors d'essais en laboratoire, une bioaccumulation de néodyme (attribuée aux aimants permanents présents dans les turbines) chez des moules (*Mytilus edulis*) exposées à des concentrations correspondant à des gradients de pollution faibles à élevés, associée à des effets toxiques chez les bivalves, notamment des lésions cellulaires et un déséquilibre redox (stress oxydatif cellulaire).

Enfin, les travaux de Hammar *et al.* (2014) montrent, à l'aide d'une approche de modélisation fondée sur l'analyse de risque (ERA/WoE), des effets potentiels mais négligeables de déversements accidentels de lubrifiants liés à une panne de turbine sur le recrutement de juvéniles de cabillaud.

Dans l'ensemble, les effets documentés demeurent localisés et majoritairement sublétaux (c'est-à-dire n'entraînant pas la mort mais susceptibles d'induire des dysfonctionnements physiologiques à long terme). Les conséquences

potentielles à l'échelle des populations ou des écosystèmes ne peuvent, à ce stade, être caractérisées de manière robuste au regard des données disponibles.

Espèces biologiques

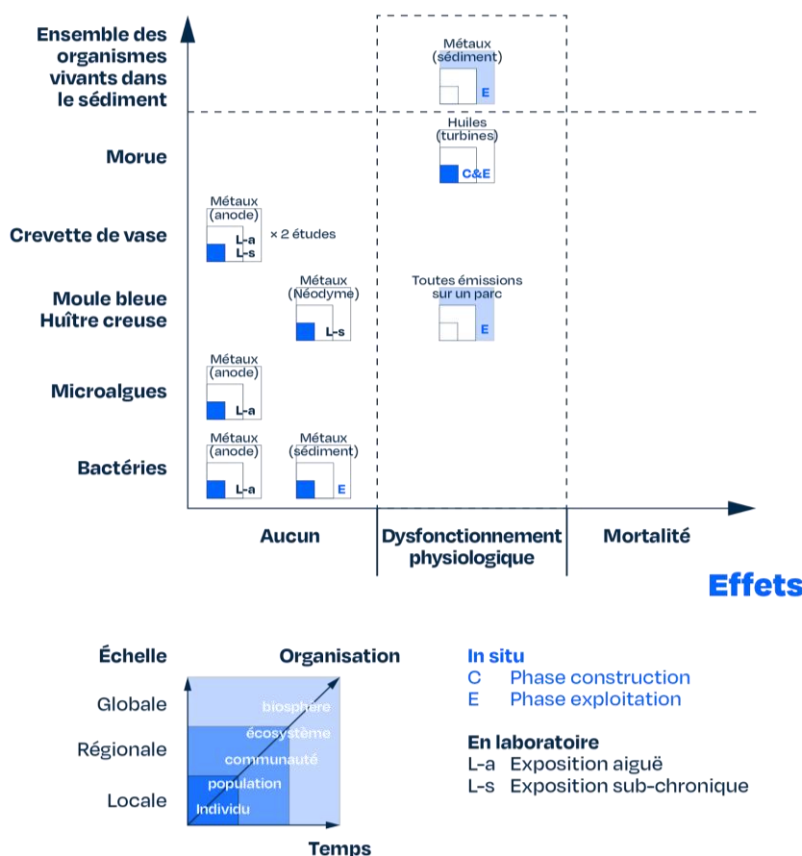


Figure 15. Synthèse des effets documentés liés aux émissions chimiques induites par les éoliennes en mer. ETMs : Éléments Traces Métalliques.

4. Incertitudes et lacunes de connaissances

L'interprétation des effets potentiels des émissions chimiques associées aux éoliennes en mer est limitée par des incertitudes fortes à toutes les phases de développement d'un parc (construction, exploitation, démantèlement) :

- Le très faible nombre d'études constitue une limite majeure, tant pour l'évaluation des effets directs que pour l'analyse des effets cumulés ;
- Les effets à long terme des expositions chroniques aux contaminants restent largement inconnus ;
- Les interactions potentielles entre les émissions chimiques (effets cocktail), l'amplification de la capacité de piégeage des polluants dans les sédiments liée à la modification des habitats benthiques environnants les structures (effet cascade) demeurent peu documentées ;
- La variabilité des réponses biologiques des espèces et des communautés demeure insuffisamment caractérisée ;
- La littérature fait état de divergences quant à l'ampleur et à la significativité écologique des apports associés aux anodes galvaniques, aux peintures et aux câbles : certains travaux considèrent ces flux comme préoccupants, tandis que d'autres les jugent marginaux au regard des sources de fond (activités portuaires, navigation) ;

- La caractérisation des flux de contaminants (quantification, origine, dynamique de dispersion) demeure encore insuffisante.

5. Contextualisation des résultats à partir de la littérature complémentaire

La littérature complémentaire mobilisée s'appuie sur :

- Des rapports de recommandation issus d'études menées dans le domaine des éoliennes en mer, en particulier ANODE 2019-2020, ECOCAP 2021-2024, PolluECUME 2022-2024, ainsi que les articles scientifiques associés récemment publiés ;
- Des articles scientifiques publiés après mars 2024 consacrés aux pressions chimiques dans le cadre des programmes européens Interreg ANEMOI (2023-2027) et OffChEm (2017-2023) ;
- Des travaux portant sur des systèmes analogues (activités portuaires : 46 publications ; activités maritimes : 104 publications ; plateformes pétrolières offshore : 29 publications ; épaves : 44 publications).

Cette littérature complémentaire permet de documenter plus précisément les effets liés :

- Aux systèmes de protection cathodique par anodes galvaniques ou à courant imposé ;
- Aux peintures antifouling et anticorrosion ;
- À d'autres sources d'émissions et à leurs effets combinés (« effet cocktail »), incluant notamment les microplastiques, les eaux de ballast, les substances per- et polyfluoroalkylées (PFAS), les contaminants spécifiques au trafic maritime, ainsi que les interactions chimiques complexes et leurs implications pour la biosurveillance.

L'analyse de cette littérature complémentaire met en évidence la nécessité d'évaluer de manière approfondie les émissions chimiques associées aux parcs éoliens en mer et leurs effets sur les écosystèmes. Elle vient également conforter et contextualiser les quelques résultats issus de la revue systématique, notamment sur les principales sources d'émissions de substances chimiques identifiées et étudiées ces dernières années. Celles-ci proviennent principalement :

- Des systèmes de protection cathodique, par anodes galvaniques, libérant des éléments traces métalliques (ETMs) (Dallet *et al.*, 2024 ; Hengstmann *et al.*, 2025 ; Ebeling *et al.*, 2025 ; Zonderman *et al.*, 2025), ou à courant imposé, susceptibles de libérer des composés organochlorés et organobromés (de Leeuw van Weenen *et al.*, 2026a ; de Leeuw van Weenen *et al.*, 2026b) ;
- Des peintures anticorrosion et antifouling, susceptibles d'émettre des solvants, des additifs, des stabilisants, des PFAS, ainsi que certains inhibiteurs de corrosion tels que le zinc (Kirchgeorg *et al.*, 2018 ; Juhl *et al.*, 2024) ;
- Des composants des infrastructures (turbines, pales, câbles et lignes d'ancrage), pouvant relarguer des microplastiques et/ou des molécules organiques (Tamburri *et al.*, 2022 ; Moore, 2008 ; Napper *et al.*, 2022 ; Mishnaevsky *et al.*, 2024 ; Caboni *et al.*, 2025 ; Paredes et Vianello, 2025) ;
- Des activités maritimes associées aux parcs, notamment via des émissions d'oxydes de soufre et autres (Jung et Madon, 2021).

Cette analyse souligne la complexité d'évaluer, à l'échelle d'un parc, les effets liés à des pressions chimiques multiples (effets « cocktail » intégrant l'ensemble des substances susceptibles d'être émises localement). Il est également complexe d'estimer leur contribution relative par rapport aux apports globaux de substances potentiellement polluantes, incluant celles provenant d'autres sources et émises à l'échelle régionale telles que par des apports fluviaux, des activités portuaires ou le transport maritime. À ce jour, une seule étude a tenté cet exercice en baie de Seine et a montré, par modélisation, une faible contribution de l'aluminium émis par un parc équipé

d'anodes galvaniques par rapport aux apports des fleuves côtiers régionaux (résultats issus du projet ECOCAP, en attente de publication).

MESSAGES-CLÉS

- Les émissions chimiques associées aux éoliennes en mer constituent une pression peu documentée car peu étudiée, reposant sur un corpus scientifique très limité (7 articles) ;
- Les anodes galvaniques constituent la principale source étudiée d'émissions chimiques, avec une bioaccumulation possible de certains métaux (aluminium, zinc et indium) chez les espèces marines étudiées. Toutefois, les études du corpus n'ont pas mis en évidence de toxicité aiguë associée à cette accumulation. Même en situation d'exposition à de fortes concentrations de ces métaux sur une courte durée (de quelques heures à quelques jours), aucun effet toxique n'a été mesuré ;
- Les effets biologiques mis en évidence sont principalement sublétaux (c'est-à-dire n'entraînant pas la mort mais susceptibles d'induire des dysfonctionnements physiologiques à long terme) et localisés, concernant notamment quelques organismes ciblés ;
- Les éventuelles conséquences à l'échelle des populations, des communautés et des réseaux trophiques demeurent largement incertaines ;
- Les éventuels effets à long terme et cumulés (« effet cocktail » chimique), à toutes les phases de développement d'un parc éolien (construction, exploitation, et démantèlement), constituent des lacunes majeures de connaissances ;
- La transposabilité aux eaux françaises doit être envisagée avec prudence, compte tenu du faible nombre d'études, de la diversité des contextes environnementaux locaux et des évolutions technologiques susceptibles d'influencer la nature et l'intensité des émissions chimiques. À titre d'exemple, l'état des pressions chimiques actuelles ou passées propres aux environnements étudiés, qu'ils soient fortement ou faiblement exposés, doit être considéré dans sa spécificité locale et/ou régionale avant de transposer les effets observés à d'autres écosystèmes présentant des niveaux d'imprégnation chimique différents, notamment ceux concernés par la construction ou les projets d'implantation de parcs éoliens en mer en France.

6. Émissions sonores

1. Description de la pression et hypothèses d'effets

Le son est un phénomène physique correspondant à la propagation d'une onde dans un milieu. Il constitue un élément fondamental de l'environnement marin, utilisé par les animaux pour communiquer, s'orienter, se repérer dans le milieu ou détecter des proies et des prédateurs, etc. Le paysage acoustique marin résulte de la superposition de trois composantes : la biophonie, produite par les organismes vivants, la géophonie, liée aux phénomènes naturels abiotiques (vagues, vent, précipitations, séismes, etc.), et l'anthropophonie, générée par les activités humaines. Le développement des éoliennes en mer contribue à cette anthropophonie par l'émission de sons sous-marins susceptibles d'affecter la biodiversité marine. Sous l'eau, le son se propage efficacement et peut ainsi avoir des effets au-delà de l'emprise physique immédiate des parcs.

Émissions sonores liées aux différentes phases de vie des éoliennes en mer

Des émissions acoustiques sont générées tout au long du cycle de développement des parcs (Figure 16). Elles sont par exemple associées aux activités de construction. L'installation des fondations dans le sédiment, notamment par la technique de battage de pieux, produit des signaux impulsifs de forte intensité couvrant une large bande de fréquences. Des techniques alternatives, telles que le forage ou l'utilisation de fondations gravitaires, peuvent également être mises en œuvre selon les caractéristiques des sites d'implantation et permettent de réduire les émissions sonores associées à cette phase. À ces émissions s'ajoutent des sons continus ou intermittents liés aux activités connexes, comme la navigation des navires de chantier ainsi que les opérations de pose et d'ensouillage des câbles. En phase d'exploitation, les parcs éoliens génèrent des émissions sonores continues de plus faible intensité que celles produites lors du battage de pieux. Ces émissions proviennent à la fois du fonctionnement des turbines, des vibrations mécaniques transmises à la colonne d'eau et aux sédiments, ainsi que du trafic maritime associé. Enfin, les émissions sonores associées à la phase de démantèlement des parcs restent encore à caractériser.

Recouvrement acoustique entre les sons anthropiques liés aux éoliennes et la faune marine

L'ensemble de ces émissions acoustiques présente des caractéristiques, notamment sur le plan des fréquences, qui peuvent correspondre aux sons produits et/ou détectés par la faune marine. Lorsqu'un son est perçu comme gênant ou perturbateur, il est qualifié de bruit. L'évolution a conduit à l'existence d'organes de production et de réception du son très diversifiés selon les grands groupes d'animaux, dont le fonctionnement reste, pour certains d'entre eux, encore imparfaitement compris. Les groupes biologiques concernés incluent par exemple les mammifères marins, les poissons, les crustacés, les bivalves et céphalopodes. Les capacités auditives et les usages du son diffèrent fortement d'un groupe biologique à l'autre, mais tous peuvent être affectés par l'exposition aux bruits sous-marins.

Cadre analytique – Synthèse des effets potentiels associés aux émissions sonores induites par les éoliennes en mer

- Des perturbations comportementales, telles que des modifications de déplacements, de l'utilisation de l'espace ou d'activités biologiques essentielles, comme la recherche de nourriture et la chasse, la communication intra- et interspécifique, la socialisation, ou encore la reproduction ;
- Des modifications physiologiques, notamment liées aux réponses au stress ;
- Des atteintes auditives, pouvant être temporaires ou permanentes.

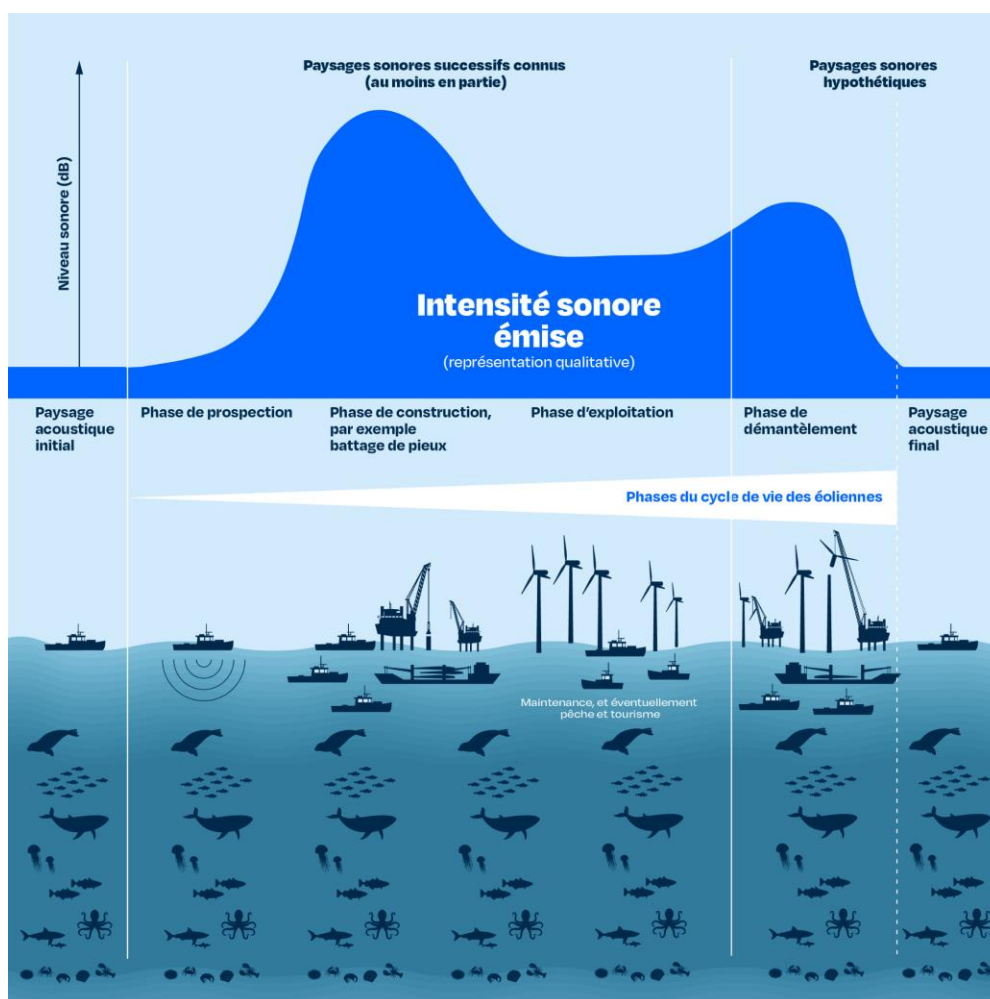


Figure 16. Synthèse des émissions sonores associées à l'éolien en mer.

2. Description du corpus de la revue systématique

Le corpus analysé comprend 74 articles, représentant au total 137 études. Une augmentation nette du nombre de publications est observée à partir du milieu des années 2000, en lien avec l'essor du développement de l'éolien en mer.

Les travaux sont principalement conduits en Europe, avec une forte concentration en Atlantique nord (le Royaume-Uni étant le pays le plus représenté). Aucune étude *in situ* menée en France n'a été identifiée dans le corpus analysé.

Les études sont menées en grande partie *in situ*, et portent majoritairement sur la phase de construction (60 % des études). Elles concernent principalement le bruit généré lors du battage de pieux. Les phases de pré-construction et d'exploitation sont nettement moins documentées.

Les mammifères marins constituent le groupe biologique le plus étudié, représentant environ 64 % des études, avec une forte prédominance du marsouin commun (*Phocoena phocoena*), qui concentre à lui seul environ un tiers des travaux. Les poissons téléostéens constituent le deuxième groupe le plus représenté, tandis que les céphalopodes, crustacés et bivalves sont très marginalement abordés.

La majorité des variables essentielles de la biodiversité (EBV) examinées dans les études portant sur les effets du bruit relève des traits de vie des organismes (physiologie, comportement, déplacement, voire mortalité) et des populations d'espèces (migration, distribution, abondance).

3. État des connaissances – Ce que dit la science

Les résultats disponibles montrent que le bruit sous-marin associé aux éoliennes en mer entraîne des effets biologiques détectables dans la majorité (85 %) des études, et ce pour quasiment tous les groupes biologiques étudiés (Figure 17). Il s'agit très majoritairement d'effets temporaires, correspondant à des modifications comportementales, physiologiques et auditives. Des comportements de fuite induits par le bruit ont par exemple été observés dans plus de 10 études portant sur les marsouins communs. Dans moins de 6 % des études, des effets permanents ont été mis en évidence ou modélisés (par exemple sur l'audition chez des phoques veau-marin (*Phoca vitulina*), à plusieurs kilomètres de sites de battage de pieux, Hastie *et al.*, 2015 ; Whyte *et al.*, 2020). À l'inverse, 15 % des études ne détectent aucun effet mesurable du bruit émis par les éoliennes sur les différents groupes biologiques.

Chez les mammifères marins, les effets les plus fréquemment documentés concernent des modifications de l'utilisation de l'espace, incluant des comportements d'évitement, des changements de trajectoire de déplacement et des perturbations de certaines activités (telles que la recherche de nourriture, la communication entre individus, l'accouplement, l'allaitement ou le repos). Des phénomènes de masquage acoustique, lorsque les sons anthropiques couvrent les sons émis ou entendus par les animaux, et des pertes auditives temporaires, voire permanentes (dans peu de cas), sont également rapportées. Les distances auxquelles des effets sont détectés lors du battage de pieux peuvent être importantes, atteignant plusieurs dizaines de kilomètres, avec des valeurs maximales proches de 80 km.

Les poissons téléostéens présentent principalement des réponses comportementales lors d'expositions à des bruits impulsionnels, telles que des réactions de fuite ou des modifications temporaires de l'activité, ainsi que des réponses physiologiques, notamment des réactions de stress (élévation du cortisol) et des modifications de la respiration et du rythme cardiaque. Dans certains cas, des atteintes auditives temporaires sont également rapportées. Les distances d'effet observées pour les poissons sont nettement plus limitées que chez les mammifères marins, généralement de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de mètres.

Les invertébrés marins, incluant notamment les céphalopodes, les bivalves et les crustacés, sont très peu étudiés. Les résultats disponibles concernent principalement des réponses comportementales et physiologiques observées en conditions expérimentales, et ne permettent pas de caractériser finement leur sensibilité au bruit en conditions naturelles. Les réponses varient selon l'espèce ou le groupe considéré, mais sont le plus souvent de nature comportementale et peuvent s'accompagner de conséquences physiologiques (stress, coût énergétique, diminution des capacités de réponse face aux prédateurs, etc.). La sensibilité au bruit peut également varier selon le stade de vie, certains travaux suggérant des effets sur des processus clés chez les larves, notamment la métamorphose chez les bivalves. Un point important est que les résultats obtenus pour une espèce ou un stade de vie donné ne peuvent être généralisés à l'ensemble des invertébrés, qui regroupent des groupes taxonomiques très distincts dont les sensibilités et les stratégies de réponse au bruit peuvent fortement différer.

Près d'un tiers des études consacrées aux mammifères intègrent des mesures d'atténuation, principalement orientées vers la réduction de l'effet — en diminuant la probabilité de présence des animaux au moment de l'émission du bruit, grâce à des dispositifs de dissuasion acoustique ou à une programmation saisonnière ciblée des travaux — plutôt que vers la réduction de la pression à la source, par exemple au moyen de rideaux de bulles ou de techniques alternatives au battage de pieux.

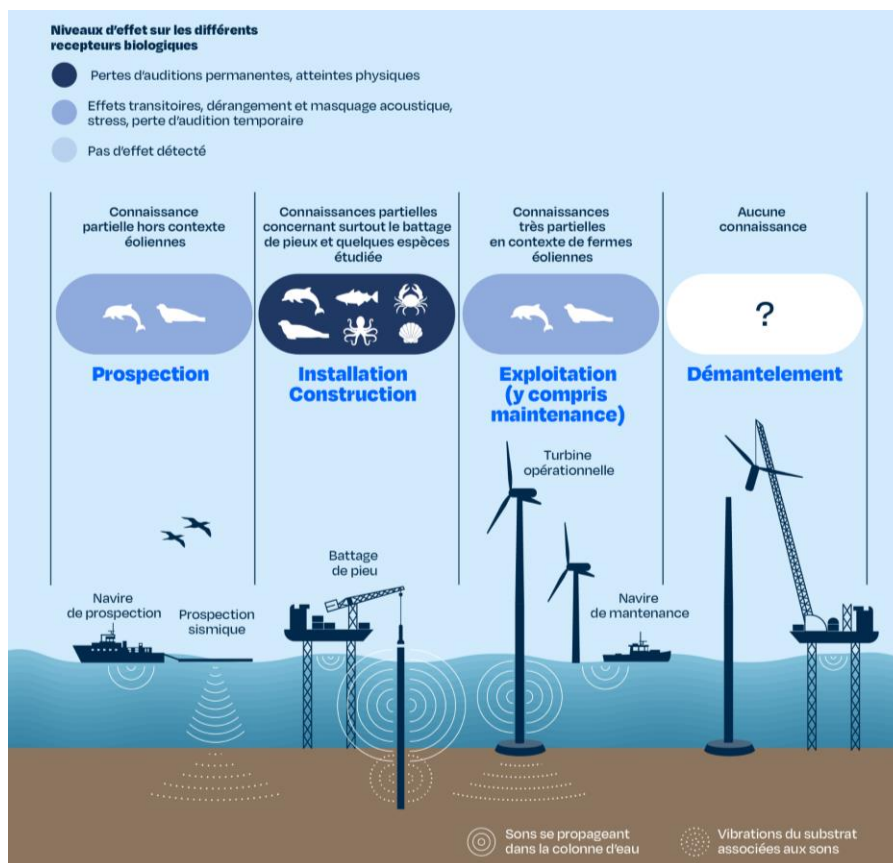


Figure 17. Synthèse des effets documentés des émissions sonores induites par les éoliennes en mer. La figure présente, pour chacune des phases de développement d'un parc éolien en mer, le niveau de connaissances disponible dans le corpus de la revue systématique de littérature ainsi que le niveau maximal d'effet documenté pour les différents groupes biologiques. Les sources sonores sont distinguées selon leur mode de propagation (colonne d'eau ou substrat). La phase de construction est la mieux documentée, tandis que les phases de prospection, d'exploitation et surtout de démantèlement demeurent beaucoup moins étudiées.

4. Incertitudes et lacunes de connaissances

Les résultats disponibles doivent être interprétés à la lumière de plusieurs incertitudes et limites de connaissances, fondamentales, méthodologiques et de suivis de terrains à large spectre taxonomique, qui conditionnent la portée des conclusions sur les effets du bruit sous-marin associé aux éoliennes en mer :

- Les résultats reposent sur un nombre limité d'espèces et de stades de vie (les adultes sont étudiés de manière prépondérante). Une forte prédominance des mammifères marins est constatée, en particulier du marsouin commun, ce qui limite les possibilités de généralisation. Cela vaut aussi bien au sein des mammifères marins — le marsouin commun appartenant au groupe des cétacés dits « à très haute fréquence », acoustiquement atypique du fait de capacités d'émission et de perception des sons dans des gammes fréquentielles distinctes de celles d'autres groupes de cétacés (Southall *et al.*, 2019) — qu'à plus forte raison à l'ensemble de la faune marine. Les poissons téléostéens sont moins documentés et principalement étudiés à l'échelle individuelle, ce qui limite l'analyse des effets à l'échelle des populations ;
- Les invertébrés marins, incluant des groupes à forte valeur commerciale comme les céphalopodes et les bivalves, restent très insuffisamment étudiés, avec des incertitudes importantes sur leurs capacités auditives et leur sensibilité au bruit ;
- Les études se concentrent majoritairement sur la phase de construction, tandis que les phases de pré-construction, d'exploitation et de démantèlement sont peu ou pas documentées.

5. Contextualisation des résultats à partir de la littérature complémentaire

Ces travaux d'expertise scientifique font suite à une précédente revue de la littérature conduite par le CNRS en 2021, dont l'objectif était de synthétiser l'ensemble des études portant sur les effets du bruit lié aux éoliennes en mer sur la faune marine (Bonnell *et al.*, 2022). Certaines sources d'émissions sonores associées aux différentes phases de développement des parcs éoliens en mer restent encore peu documentées dans ce cadre précis, notamment la prospection et le trafic maritime, et sont donc peu représentées dans le corpus issu de la revue systématique. Elles sont néanmoins, pour partie, prises en compte dans d'autres contextes analogues par Bonnell *et al.* (2022). Il est donc pertinent de s'y référer afin de contextualiser certains des résultats présentés.

Au-delà du battage de pieux, l'ouvrage CNRS montre en effet que les phases de prospection (sonars, sources sismiques) et de fonctionnement des parcs (bruits continus, vibrations transmises à la colonne d'eau et aux sédiments) constituent des sources sonores persistantes susceptibles de générer des effets comportementaux, du masquage acoustique et des perturbations chroniques chez l'ensemble des groupes biologiques. Ces pressions, moins intenses mais plus durables, soulignent l'importance d'intégrer les effets cumulés et les expositions de long terme dans l'évaluation écologique des parcs éoliens offshore.

Par ailleurs, les travaux de Southall *et al.* (2019) et d'Erbe *et al.* (2025), spécifiquement consacrés aux mammifères marins, rassemblent de nombreuses connaissances disponibles sur l'usage du son et les effets de l'anthropophonie (ensemble des sons produits par les activités humaines), et apportent ainsi des éléments de contexte importants pour l'interprétation des résultats relatifs à ce groupe biologique. L'un des principaux enseignements est que l'anthropophonie constitue une source de pollution sonore majeure, largement répandue dans les milieux marins.

MESSAGES-CLÉS

- Le bruit sous-marin associé aux éoliennes en mer constitue une pression anthropique clairement identifiée, particulièrement marquée pendant la phase de construction, notamment lors du battage de pieux ;
- La majorité des études disponibles (plus de 85 %) met en évidence des effets biologiques détectables, principalement sur le comportement, la physiologie ou l'audition des organismes exposés ;
- Les effets permanents sont rares au regard des données disponibles (moins de 6 % des études) ;
- Les mammifères marins constituent le groupe biologique le plus étudié. Toutefois, les travaux se concentrent fortement sur le marsouin commun, une espèce particulièrement abondante en Atlantique Nord-Est mais présentant des caractéristiques acoustiques atypiques. Les résultats qui en sont issus ne peuvent donc être que difficilement généralisés à l'ensemble des espèces de ce groupe ;
- Les poissons téléostéens présentent des réponses comportementales et physiologiques mesurables, mais elles sont majoritairement étudiées à l'échelle individuelle, ce qui limite l'interprétation des effets à l'échelle des populations ;
- Les invertébrés marins restent très insuffisamment étudiés, et les connaissances relatives à leurs capacités auditives et à leur sensibilité au bruit restent limitées ;
- Les distances d'effet varient fortement selon les groupes biologiques, pouvant atteindre plusieurs dizaines de kilomètres pour certains mammifères marins lors du battage de pieux, contre quelques dizaines à quelques centaines de mètres pour les poissons et invertébrés ;
- Les effets à long terme, cumulés et à large échelle spatiale demeurent largement incertains car non étudiés, ce qui invite à une interprétation prudente des connaissances actuellement disponibles ;
- Le recours, *in situ* et sur le long terme, à des méthodes innovantes d'expérimentation et d'observation, incluant des inventaires de biodiversité à spectre large et des analyses de leurs variations, reste insuffisant pour mieux évaluer les effets chroniques de l'anthropophonie sur la biodiversité marine et les écosystèmes locaux à des niveaux intégrateurs.

7. Autres introductions d'énergies : champs électromagnétiques, lumière artificielle, chaleur

1. Description de la pression et hypothèses d'effets

Le fonctionnement des parcs éoliens en mer s'accompagne de l'introduction de plusieurs formes d'énergie dans le milieu marin, susceptibles de constituer des pressions pour certaines composantes de la biodiversité. Ces apports énergétiques concernent principalement les champs électromagnétiques, la lumière artificielle et l'augmentation locale de la température.

Les champs électromagnétiques sont générés par le passage du courant électrique dans les câbles inter-éoliennes et les câbles de raccordement durant toute la phase d'exploitation d'un parc éolien en mer, entraînant une perturbation locale du champ électromagnétique terrestre. Ils peuvent être perçus par des espèces électro- et/ou magnéto-sensibles jusqu'à quelques mètres des câbles en fonctionnement et leur intensité varie en fonction du courant électrique qui les parcourt. De plus, le mouvement de tout corps conducteur (par exemple un organisme ou une masse d'eau salée) à l'intérieur d'un champ magnétique génère un champ électrique induit, de très faible intensité, mais néanmoins perceptible par certaines espèces marines.

La lumière artificielle est émise par les navires d'intervention lors des phases de construction et de démantèlement, ainsi que par les mâts des éoliennes et les sous-stations électriques durant toute la phase d'exploitation. Elle peut être perceptible sur de longues distances, de l'ordre de plusieurs kilomètres, notamment en conditions de faible luminosité naturelle.

L'augmentation locale de la température se produit durant la phase d'exploitation, et résulte (i) du passage du courant électrique dans les éléments conducteurs des câbles (effet Joule), entraînant un échauffement de l'eau et des sédiments situés à proximité immédiate, et (ii) du refroidissement de certains équipements, notamment des sous-stations électriques, avec une dissipation de chaleur dans l'air. Ces effets restent très localisés, avec une extension spatiale limitée à quelques dizaines de centimètres autour des câbles en fonctionnement.

Cadre analytique – Synthèse des effets potentiels associés aux autres introductions d'énergies (champs électromagnétiques, lumière artificielle, chaleur) induites par les éoliennes en mer (Figure 18)

- Des modifications comportementales chez certaines espèces sensibles aux champs électromagnétiques (invertébrés benthiques, poissons) ;
- Des perturbations des capacités d'orientation, de déplacement ;
- Des perturbations des capacités de détection des proies ;
- Des effets à différents niveaux d'organisation du vivant (moléculaire, cellulaire, individu, population, communauté) ;
- Des effets physiologiques à différents stades du cycle de vie, incluant des perturbations du développement aux stades embryonnaire et juvénile, ainsi qu'une altération de la condition physiologique au stade adulte ;
- Des modifications comportementales chez certaines espèces sensibles à la lumière artificielle (oiseaux, chiroptères), en lien avec des phénomènes d'attraction ou de répulsion.



Figure 18. Synthèse des effets potentiels associés aux autres introductions d'énergies (champs électromagnétiques, lumière artificielle, chaleur) induites par les éoliennes en mer.

2. Description du corpus de la revue systématique

Le corpus mobilisé se compose de 125 études, issues de 21 articles scientifiques publiés entre 2004 et 2023.

La très grande majorité de ces travaux concerne les champs électromagnétiques, qui représentent 85,7 % des articles et 81,6 % des études. La lumière artificielle est abordée dans 14,3 % des articles (18,4 % des études). Aucun article du corpus considéré ne traite spécifiquement des effets d'une augmentation locale de température liée au fonctionnement des parcs éoliens sur la biodiversité marine.

Pour les champs électromagnétiques, les groupes biologiques étudiés sont principalement les invertébrés benthiques (11 espèces, 9 articles, 73 études) et les poissons (9 espèces et un groupe d'espèces, 11 articles, 29 études).

Pour la lumière artificielle, deux articles concernent les oiseaux (22 études) et un seul article porte sur les chiroptères (1 étude).

Enfin, la quasi-totalité des études relatives aux champs électromagnétiques porte sur le champ magnétique, le champ électrique n'étant explicitement examiné que dans une seule étude.

Les méthodes utilisées reposent majoritairement sur :

- Pour les champs électromagnétiques : des expérimentations contrôlées en laboratoire (12 articles, représentant 83,3 % des études), complétées par quelques études menées *in situ* (5 articles, 15,7 % des études) et une analyse de risque (1 % des études) ;
- Pour la lumière artificielle : uniquement des observations comportementales ciblées réalisées *in situ*, principalement en Europe du Nord.

Les variables essentielles de biodiversité (EBV) étudiées concernent principalement :

- La répartition spatiale des individus par rapport aux sources de pression (31,2 % des études) ;
- La condition physiologique individuelle (24,8 % ; stress, succès migratoire) ainsi que la mortalité (7,2 %) ;
- L'activité (26,4 % ; taux et vitesse de déplacement, temps passé dans un abri, bioturbation, comportements de nage) ;
- Le développement aux stades précoces (œufs et larves ; 8,8 %).

Les études menées à l'échelle des communautés demeurent marginales (1 article, soit 1,6 % des études).

3. État des connaissances – Ce que dit la science

Champs électromagnétiques

La majorité des études portant sur les champs électromagnétiques (71,6 %, toutes espèces et indicateurs confondus) ne met en évidence aucun effet significatif sur le modèle biologique considéré (Figure 19). Parmi les cas d'étude montrant un effet significatif, des proportions comparables d'augmentation, de diminution ou d'évolution variable des indicateurs sont observées par rapport à la condition « témoin ».

Chez les invertébrés benthiques, des effets sont rapportés sur la condition physiologique des individus, le développement larvaire, l'activité et la distribution spatiale. Par exemple, une augmentation de la bioturbation et une diminution de l'excrétion azotée ont été observées chez un ver polychète (genre *Nereis*) (Jakubowska *et al.*, 2019), ainsi qu'une diminution de la consommation alimentaire et de l'excrétion azotée chez un coquillage (la coque, *Cerastoderma glaucum*) (Jakubowska-Lehrmann *et al.*, 2022). Pour ces deux espèces, des modifications de l'expression de marqueurs de stress sont également rapportées, dans des directions variables. Chez le tourteau (*Cancer pagurus*), aucun effet n'est observé pour une exposition à un champ magnétique de 250 microteslas (soit environ cinq fois l'intensité du champ magnétique terrestre ; cette valeur correspond approximativement à l'intensité du champ magnétique ressenti à 1 mètre d'un câble parcouru par un courant électrique de 1000 ampères), mais une augmentation de l'activité et une diminution de la concentration en lactate (indicateur de stress physiologique) sont mesurées lorsque l'intensité du champ appliqué atteint 1 millitesla (Scott *et al.*, 2021).

Chez les poissons, des modifications de l'activité (notamment des comportements de nage), de la distribution spatiale et de la condition physiologique, en particulier au stade larvaire, sont rapportées. Les effets restent toutefois difficiles à généraliser. Par exemple, la vitesse de nage au passage d'un câble électrique sous-marin augmente chez le saumon royal (*Oncorhynchus tshawytscha*) (Wyman *et al.*, 2018), tandis qu'elle diminue chez l'anguille européenne (*Anguilla anguilla*), sans que leur succès migratoire ne soit affecté (Westerberg *et al.*, 2008). Une expérimentation *in situ* menée sur la raie hérisson (*Leucoraja erinacea*) montre également une augmentation du comportement d'exploration (distance parcourue, proportion de virages, proximité par rapport au fond marin) sous l'effet du champ électromagnétique d'un câble en fonctionnement, correspondant à une perturbation magnétique inférieure à 20 micro teslas (Hutchison *et al.*, 2020).

Concernant la distribution spatiale des organismes marins (invertébrés benthiques, poissons) par rapport à la source de champ électromagnétique, aucune tendance générale d'attraction ou de répulsion ne se dégage. Enfin, l'ensemble des travaux consultés convergent vers une absence d'effet significatif sur la mortalité des individus.

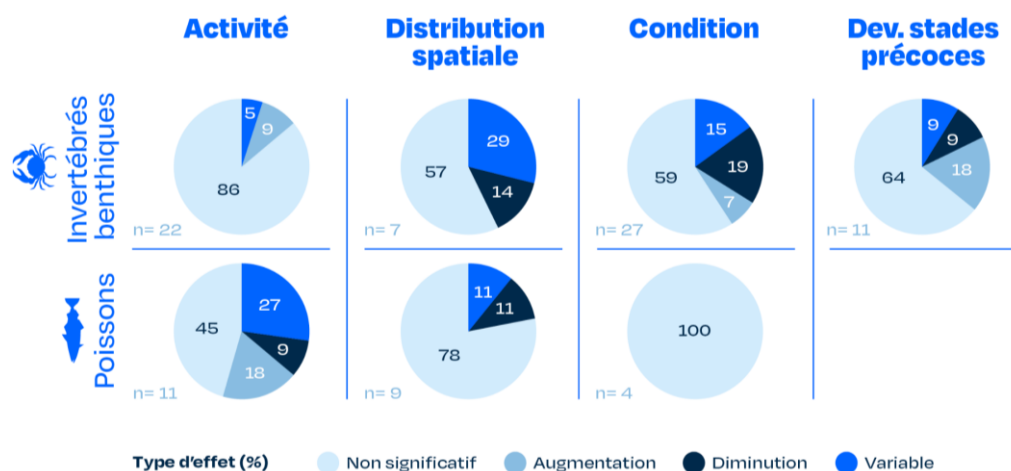


Figure 19. Synthèse des effets documentés liés à l'introduction de champs électromagnétiques induite par les éoliennes en mer.

Lumière artificielle

La majorité des études (69,6 %) ne met pas en évidence d'effet significatif de la lumière artificielle sur les oiseaux, et les effets rapportés concernent principalement des réponses comportementales (Figure 20). Les lumières vertes, bleues et blanches apparaissent les plus susceptibles d'attirer les individus, notamment en cas d'éclairage continu et lorsque les étoiles ne sont pas visibles (Rebke *et al.*, 2019). À l'inverse, les lumières rouges et les éclairages clignotants ne présentent pas d'effet d'attraction. Une réponse de type répulsion est par ailleurs observée pour des longueurs d'onde situées dans l'ultraviolet (May *et al.*, 2017).

Un seul cas d'étude porte sur une espèce de chauve-souris (la noctule commune, *Nyctalus noctula*), ce qui ne permet pas de conclure sur les effets de la lumière artificielle sur les chiroptères (Figure 20). La fréquentation des éoliennes en mer par ces espèces pourrait toutefois être liée, de manière indirecte, à l'attraction de leurs proies (insectes) par la lumière artificielle.

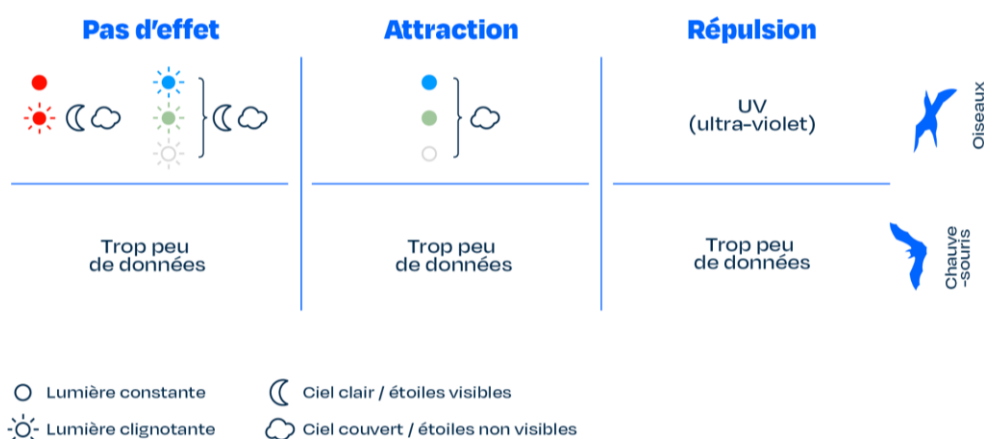


Figure 20. Synthèse des effets documentés liés à l'introduction de lumière artificielle induite par les éoliennes en mer.

4. Incertitudes et lacunes de connaissances

Les incertitudes proviennent principalement de l'hétérogénéité des protocoles utilisés pour évaluer les effets des pressions, en particulier des champs électromagnétiques : les stades de vie étudiés, l'intensité des pressions, les dispositifs expérimentaux, les durées d'exposition et les indicateurs mesurés varient fortement. Cette diversité conduit à des résultats fragmentaires et peu généralisables.

Concernant les champs électromagnétiques, la prédominance d'études *in vitro* — souvent menées avec des intensités de champ nettement supérieures aux niveaux mesurés *in situ* — limite la transposabilité des résultats (en particulier de ceux mettant en évidence des effets significatifs) aux conditions réelles. Par ailleurs, les effets observés portent parfois sur des processus biologiques très spécifiques (par exemple le volume ou le poids des œufs, la distance parcourue), sans démonstration d'effets sur les principales fonctions vitales des individus ni à l'échelle des populations. Enfin, aucune étude ne permet aujourd'hui d'extrapoler ces connaissances à l'ensemble du cycle de vie des espèces.

Les principales lacunes identifiées concernent :

- La lumière artificielle, pour laquelle très peu d'études existent, avec des résultats limités à des contextes biogéographiques spécifiques et de fortes incertitudes concernant les oiseaux. Les lacunes sont également majeures pour les chiroptères, chez lesquels les mécanismes d'attraction ou de répulsion restent inconnus. Enfin, aucun travail ne porte sur les bas niveaux trophiques de la colonne d'eau, malgré quelques indications issues des recherches sur la lumière artificielle nocturne (ALAN, « *Artificial Light At Night* ») en milieu côtier ;
- Les champs électromagnétiques, pour lesquels plusieurs insuffisances sont mises en évidence :
 - Caractérisation de la pression : les niveaux d'exposition *in situ* sont rarement mesurés ou modélisés de manière rigoureuse, et sont souvent confondus avec d'autres pressions. Les expositions appliquées *in vitro* ne reflètent pas les conditions réelles, tandis que les champs électriques induits sont ignorés ;
 - Processus biologiques : les mécanismes de détection et les seuils de sensibilité demeurent mal connus. Les effets cellulaires (dégradations, coûts énergétiques) sont peu étudiés et ne peuvent être extrapolés à l'échelle individuelle ;
 - Récepteurs biologiques : plusieurs groupes (mammifères marins, tortues marines, céphalopodes) ne font l'objet d'aucune étude, malgré l'existence de preuves de sensibilité, comme l'illustre notamment le cas du grand dauphin (*Tursiops truncatus*) (Kremers *et al.*, 2014) ;
 - Expositions chroniques : aucune donnée robuste n'est disponible. Les études *in vitro* restent de courte durée (quelques mois, dans le meilleur des cas), et les travaux *in situ* concernent principalement des espèces mobiles, alors que les espèces sessiles ou peu mobiles sont potentiellement les plus exposées à long terme ;
- Le dégagement de chaleur, pour lequel aucune donnée n'est disponible sur les effets d'une augmentation locale de température liée au fonctionnement des parcs.

Ces lacunes mettent en évidence des besoins scientifiques portant notamment sur l'étude des mécanismes de détection, des seuils de sensibilité et des effets aux échelles moléculaires et cellulaires. De telles avancées contribueraient à réduire les incertitudes actuelles et à renforcer la capacité à anticiper et à encadrer les effets potentiels des pressions associées aux apports d'énergie induits par les parcs éoliens en mer.

5. Contextualisation des résultats à partir de la littérature complémentaire

Un travail complémentaire, fondé sur quatre articles récents de synthèse des connaissances, a été mené afin d'enrichir et de préciser les résultats issus de l'analyse du corpus issu de la revue systématique. Il montre que les principaux effets liés à l'introduction d'énergies par les éoliennes en mer ont été correctement appréhendés dans cette analyse. Certains éléments complémentaires apparaissent toutefois notables.

Concernant les champs électromagnétiques :

- Les articles de synthèse mentionnent davantage d'effets observés à l'échelle cellulaire et moléculaire, notamment dans des travaux relativement anciens (Ottaviani *et al.*, 2002 ; Malagoli *et al.*, 2003) ;
- Certains auteurs suggèrent que les champs électromagnétiques pourraient avoir des effets plus marqués en courant alternatif qu'en courant continu, même si les études comparatives, toutes choses égales par ailleurs, restent rares ;
- Différents processus cellulaires, documentés à des degrés variables, sont proposés pour expliquer les mécanismes de perception des champs magnétiques par les organismes vivants ;
- Les seuils de sensibilité et de détection des champs électromagnétiques restent mal connus et apparaissent spécifiques à chaque espèce ;
- Chez les poissons, une sensibilité aux champs magnétiques est démontrée pour des espèces très diverses, indiquant qu'elle n'est pas limitée à un groupe phylogénétique particulier. Pour les anguilles, les élasmobranches et les salmonidés qui utilisent les champs magnétiques naturels pour s'orienter lors de leurs déplacements, il est admis que ces espèces construisent de véritables cartes de navigation magnétique, leur permettant de se localiser et de retrouver leur lieu de naissance. Cependant, l'influence locale des champs électromagnétiques d'origine anthropique sur les patrons de migration à grande échelle demeure à ce jour inconnue ;
- Certaines espèces électrosensibles, en particulier parmi les poissons cartilagineux (raies et requins), pourraient également être sensibles aux champs électriques induits à proximité des câbles sous-marins.

La littérature complémentaire consultée confirme le faible nombre d'études menées *in situ*, généralement plus complexes à mettre en œuvre, en particulier pour les espèces de poissons de grande taille. Ces espèces présentent en effet des modes de nage variés, souvent peu compatibles avec des expérimentations réalisées en enceinte ou en conditions confinées.

Concernant la lumière artificielle :

- De manière générale, le spectre de la lumière artificielle couvre des longueurs d'onde comprises entre 350 et 800 nm. Dans les parcs éoliens en mer, la signalisation aéronautique installée sur les nacelles est généralement constituée de feux rouges clignotants (de longueur d'onde 620–630 nm), tandis que la signalisation maritime, positionnée entre 10 et 30 m au-dessus du niveau de la mer, est le plus souvent jaune (de longueur d'onde 585–595 nm) ;
- La sensibilité spectrale des récepteurs visuels des oiseaux couvre des longueurs d'onde comprises entre 360 et 570 nm (Hart, 2001), certaines études suggérant une attraction plus marquée pour les lumières bleues et les lumières blanches chaudes ;
- Pour les chauves-souris, ainsi que pour les insectes constituant leurs proies, les connaissances disponibles demeurent limitées. Les données complémentaires recensées dans la littérature concernent principalement la pipistrelle de Nathusius (*Pipistrellus nathusii*).

MESSAGES-CLÉS

Concernant les champs électromagnétiques :

- Les champs électromagnétiques n'ont pas d'effets significatifs sur la faune marine dans 71,6 % des études du corpus (toutes espèces étudiées et tous indicateurs confondus) ;
- Les effets significatifs observés concernent principalement la distribution spatiale, la condition physiologique et le développement aux stades précoces chez les invertébrés benthiques, ainsi que l'activité et la distribution spatiale chez les poissons ;
- Ces effets sont essentiellement mis en évidence à l'échelle individuelle, sans qu'ils puissent être transposés à l'échelle des populations ou à celle du cycle de vie complet des espèces ;
- Les effets d'une exposition à long terme, ainsi que les effets cumulés dans l'espace, dans un contexte de multiplication des parcs éoliens, demeurent inconnus ;
- La littérature repose majoritairement sur des études *in vitro*, avec des intensités de champ magnétique souvent très supérieures aux niveaux susceptibles d'être rencontrés dans les conditions réelles ;
- Les indicateurs mobilisés et les protocoles mis en œuvre, notamment en matière d'effort d'échantillonnage, restent hétérogènes, ce qui limite la capacité de généralisation des résultats ;
- Les espèces étudiées concernent principalement des espèces d'intérêt commercial (poissons et invertébrés). Les espèces sensibles aux champs électriques, telles que les sélaciens, sont davantage représentées dans la littérature complémentaire consultée, tandis que d'autres groupes potentiellement sensibles (tortues marines, mammifères marins, céphalopodes) restent peu ou pas étudiés ;
- Enfin, les seuils de détection et de sensibilité aux champs électromagnétiques demeurent peu documentés, à l'exception de quelques espèces de sélaciens vis-à-vis des champs électriques induits.

Concernant la lumière artificielle :

- La lumière artificielle n'a pas d'effets significatifs sur les oiseaux dans 69,6 % des études du corpus ;
- Chez les oiseaux, l'effet principalement mis en évidence correspond à une attraction nocturne, observée uniquement lorsque les étoiles ne sont pas visibles, associée à certaines longueurs d'onde (lumières vertes, bleues et blanches) ainsi qu'à un éclairage continu ;
- Les connaissances relatives aux effets potentiels de la lumière artificielle émise par les parcs éoliens en mer sur les chiroptères et leurs proies (insectes) demeurent très lacunaires.

8. Pressions à l'échelle des paysages marins

1. Description de la pression et hypothèses d'effets

Au-delà des effets locaux analysés à l'échelle d'une turbine ou d'un parc isolé, le déploiement croissant des éoliennes en mer s'accompagne d'une transformation des paysages marins (« *seascape* »). L'augmentation du nombre, de la densité et de la superficie des parcs conduit à une accumulation spatiale de structures artificielles, susceptible de générer des effets émergents qui ne peuvent être appréhendés à des échelles spatiales restreintes.

À l'échelle des paysages marins, les parcs éoliens contribuent à la fragmentation des habitats, à la création de mosaïques d'habitats et à l'émergence de nouveaux corridors de dispersion (trames). L'ensemble est à l'origine de nouvelles configurations spatiales, intégrant à la fois des habitats naturels et artificiels. Ces transformations peuvent interagir avec d'autres usages et pressions anthropiques et modifier les dynamiques écologiques à large échelle, sur le temps court comme le temps long.

Cadre analytique – Synthèse des effets potentiels à l'échelle des paysages marins associés à la présence cumulée d'éoliennes en mer, par comparaison à une situation sans éoliennes en mer (Figure 21)

- Des modifications des capacités de dispersion à l'origine de changements de connectivité des populations ;
- Des phénomènes de pas japonais (« *stepping-stone* »), favorisant la dispersion progressive, c'est-à-dire pas-à-pas, d'espèces indigènes ou non indigènes ;
- Des phénomènes de débordement (« *spill-over* ») depuis les parcs vers les habitats environnants, et vice versa (débordement retour ou « *spill-back* »), depuis les habitats environnants vers les parcs ;
- Des modifications (augmentation ou diminution) à grande échelle de l'abondance des populations et de la biomasse, pouvant s'accompagner de changements de diversité taxonomique et fonctionnelle ;
- Des changements des routes de migration et des aires de distribution.

Ces effets sont susceptibles de concerner l'ensemble des groupes biologiques, des communautés benthiques aux espèces à large mobilité (comme les oiseaux ou les mammifères marins), ce qui peut par la suite modifier la structure de l'écosystème et donc les interactions écologiques telles que la prédation, le parasitisme ou l'hybridation.

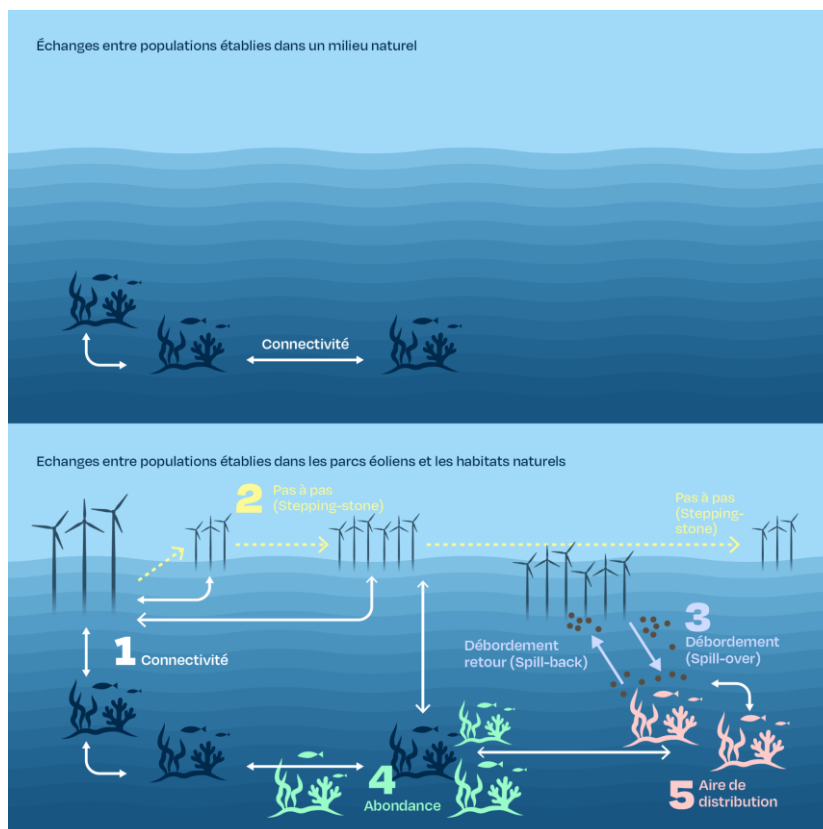


Figure 21. Synthèse des principaux effets attendus à l'échelle des paysages marins. Par comparaison avec une situation sans éoliennes (en haut), la présence d'éoliennes en mer pourrait entraîner : 1) une modification de la connectivité des populations (flèches blanches), y compris par de nouvelles voies de migration entre habitats naturels et artificiels ou entre habitats naturels, 2) des expansions par colonisation de proche en proche par pas japonais (« stepping-stone ») (flèches pointillées jaunes), 3) des phénomènes de débordement vers et depuis les habitats naturels (« spill-back » et « spill-over ») (flèches violettes). Ces changements peuvent ensuite entraîner des modifications : 4) d'abondance et de biomasse à grande échelle, ainsi que 5) d'aires de distribution. Les flèches illustrent les processus de dispersion et les échanges entre sites naturels et / ou artificiels.

2. Description du corpus de la revue systématique

Le corpus analysé regroupe 62 articles, publiés entre 2004 et 2024, correspondant à 105 études.

Les oiseaux constituent le groupe biologique le plus étudié (35 % des études), suivis des poissons (19 %), des macro-invertébrés benthiques (14 %) et des mammifères marins (10 %). Deux tiers des effets documentés au niveau spécifique concernent des espèces protégées ou exploitées, tandis qu'une seule étude porte sur une espèce non indigène (en l'occurrence un petit crustacé amphipode, la caprelle japonaise *Caprella mutica*).

Huit catégories de variables essentielles de la biodiversité (EBV) sont représentées. Les EBV liées aux populations sont les plus fréquentes, suivies de celles relatives aux traits et aux communautés. Les EBV portant sur la composition génétique sont très rarement abordés.

La quasi-totalité des études (89 %) est localisée dans l'Atlantique Nord-Est tempéré, principalement en mer du Nord (70 %) et au sein d'habitats sableux (80%). Aucune étude ne porte sur les éoliennes flottantes. Les études portent majoritairement sur des échelles spatiales macro (> 50 km, mais au sein d'une même écorégion ou d'une même mer), cohérentes avec l'analyse des effets paysagers.

Dans la majorité des études, l'évaluation des effets repose principalement sur des observations *in situ* (52 %) et des modèles numériques (29 %).

3. État des connaissances – Ce que dit la science

Les études disponibles montrent que la présence cumulée des parcs éoliens en mer est associée à une diversité d'effets à l'échelle du paysage marin, allant au-delà de la simple addition des effets locaux.

Les changements d'abondance des populations (augmentation ou diminution du nombre d'individus) constituent l'effet le plus fréquemment documenté (64 % des études), tous récepteurs biologiques confondus (Figure 22a). Les réponses observées sont contrastées selon les groupes biologiques :

- Des augmentations d'abondance sont quasiment exclusivement observées chez les poissons, notamment des espèces démersales d'importance commerciale telles que la sole (*Solea solea*), la limande (*Limanda limanda*), ou la plie commune (*Pleuronectes platessa*) (Barbut *et al.*, 2020), ainsi que chez certains macro-invertébrés, qu'ils soient pélagiques (comme la méduse aurélie (genre *Aurelia*), Vodopivec *et al.*, 2017) ou benthiques (comme le crabe dormeur (ou tourteau, *Cancer pagurus*), Stelzenmuller *et al.*, 2021) ;
- Des réponses mixtes ou non quantifiées sont également indiquées, en particulier chez les oiseaux et les autotrophes (macro-algues et phytoplancton) ;
- Des diminutions d'abondance sont quasiment exclusivement rapportées chez certaines populations d'oiseaux (comme le goéland marin *Larus maritimus*, ou le guillemot de Troïl *Uria aalge*), et de mammifères marins (comme le marsouin commun, *Phocoena phocoena*) ;
- Une absence de changement détectable est rapportée dans un tiers de ces études portant sur l'abondance, principalement pour des oiseaux, mais aussi pour des macro-invertébrés benthiques (comme le crabe vert, *Carcinus maenas*), des poissons et des reptiles.

Il convient de noter que ces observations reposent généralement sur l'étude d'une ou de quelques espèces seulement. Elles ne permettent donc pas de conclure à une modification globale de la diversité taxonomique ou fonctionnelle, même si les variations d'abondance observées constituent l'un des déterminants de tels changements à l'échelle écosystémique.

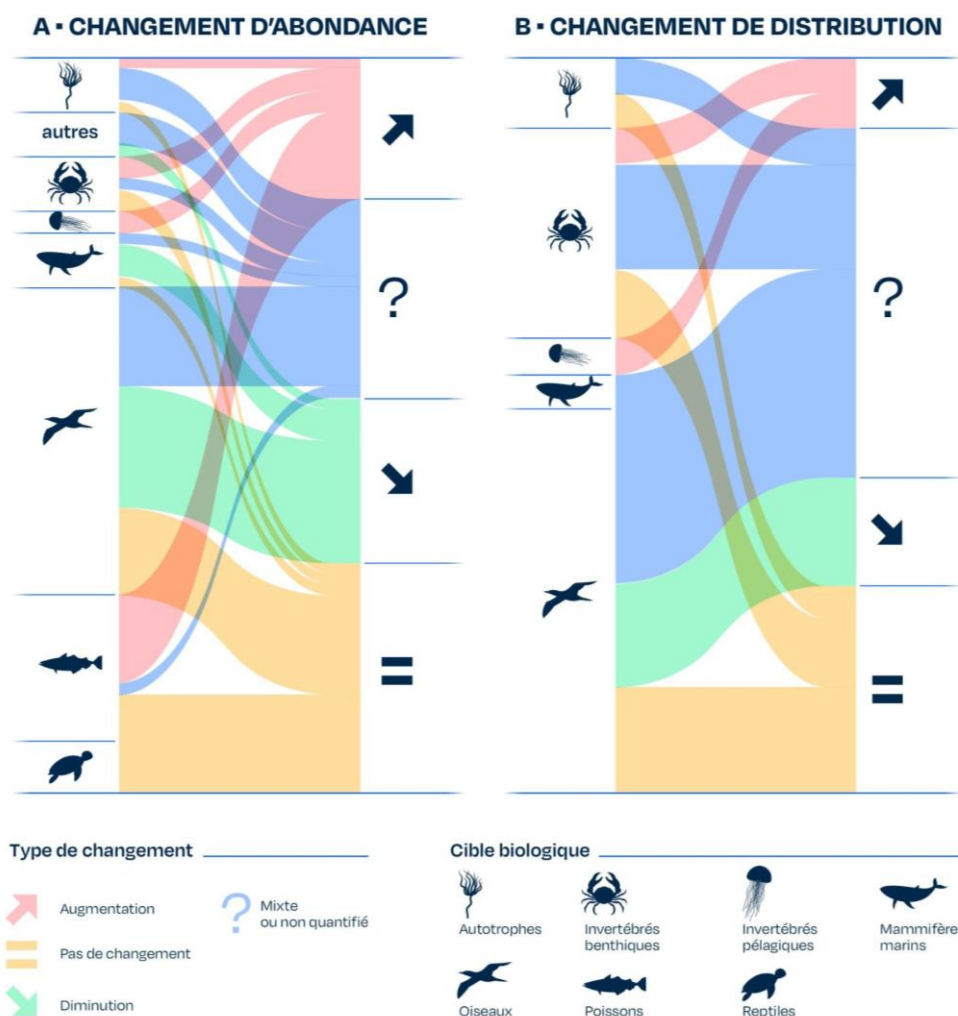


Figure 22. Répartition des études par cible biologique selon les effets documentés pour les changements d'abondance (a) et de distribution (b). Pour chaque type de cible biologique (représenté par un symbole), les types de changements observés — ou leur absence — sont indiqués par des couleurs et des symboles. Par exemple, chez les mammifères marins et les oiseaux, des diminutions d'abondance (faisceaux verts) ont été documentées. Par ailleurs, chez les oiseaux, aucune augmentation d'abondance (faisceaux violets) n'a été documentée. Nota bene : les céphalopodes sont absents des études portant sur les changements d'abondance ; les catégories plus larges « poissons », « céphalopodes » et « reptiles » sont absentes des études portant sur les changements de distribution.

Les changements d'aires de distribution (répartition spatiale des espèces) constituent un autre effet largement documenté (20 % des études), notamment chez les oiseaux, les macro-invertébrés benthiques et les autotrophes (Figure 22b). Des augmentations comme des diminutions d'aires de distribution ont été mises en évidence. Par exemple, une diminution a été observée chez certains oiseaux, comme la sterne caugek *Thalasseus sandvicensis* (van Bemmelen *et al.*, 2023), tandis qu'une augmentation a été rapportée chez la méduse Aurélie (genre *Aurelia*) (Vodopivec *et al.*, 2017). Ces changements traduisent une réorganisation spatiale des populations à grande échelle, bien que leur ampleur soit rarement quantifiée.

Les études mettent également en évidence des effets sur la connectivité, incluant des phénomènes de débordement et de pas japonais, principalement chez les macro-invertébrés benthiques, telle que la moule commune (*Mytilus edulis*) (Demmer *et al.*, 2022) ou le tourteau (*Cancer pagurus*) (Stelzenmuller *et al.*, 2021). Ces processus de débordement et de pas japonais se traduisent par une dispersion progressive d'organismes entre parcs et habitats environnants.

Il faut remarquer que ces effets peuvent se cumuler. Ainsi, chez le tourteau (crabe dormeur, *Cancer pagurus*), une augmentation de la connectivité des populations et de l'aire de distribution a été documentée, en réponse à des processus de colonisation en pas japonais et de débordement (Stelzenmuller *et al.*, 2021).

Des modifications des routes de migration sont documentées chez certaines espèces d'oiseaux, notamment chez le courlis cendré *Numenius arquata* (Schwemmer *et al.*, 2023). Enfin, des changements de structure et de fonctionnement des écosystèmes sont plus rarement étudiés (par exemple Puts *et al.*, 2023), et reposent principalement sur des approches de modélisation ou sur l'exploitation de données satellitaires relatives au phytoplancton, à la chlorophylle et/ou à la production primaire.

Ces différents effets documentés par le corpus de la revue systématique sont résumés en Figure 23.

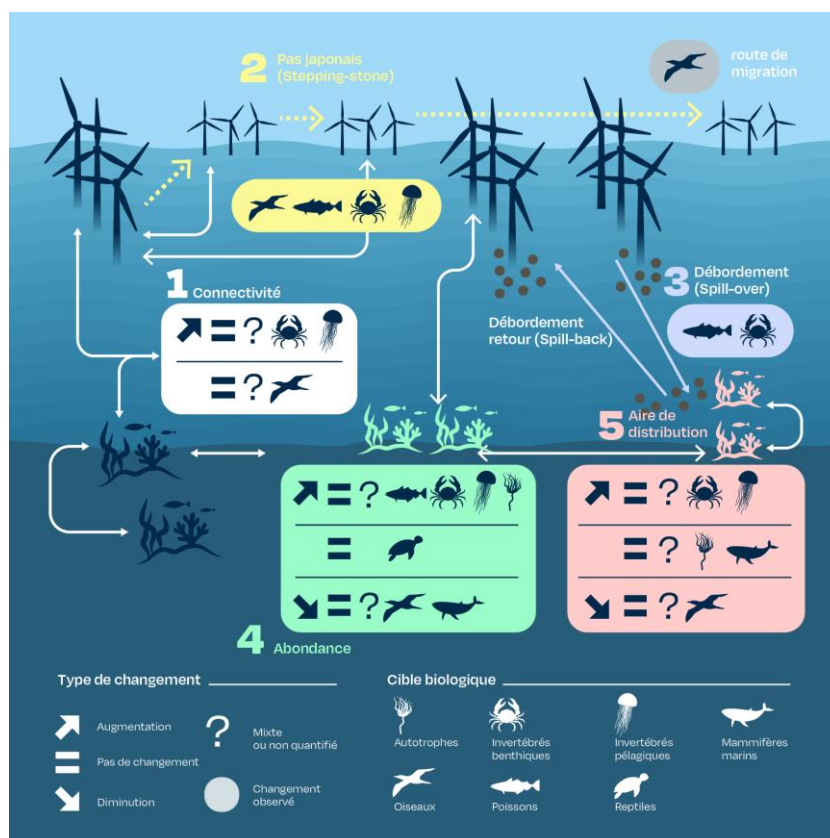


Figure 23. Synthèse des principaux effets documentés à l'échelle des paysages marins. Les types de changement sont représentés par des couleurs et des symboles, tandis que les organismes concernés sont représentés par des symboles. Les flèches illustrent les processus de dispersion et les échanges entre sites naturels et / ou artificiels. À titre d'exemple, pour la connectivité (boîte blanche), la littérature scientifique rapporte, chez les macroinvertébrés benthiques et pélagiques, des augmentations, des absences de changement ainsi que des changements mixtes ou non quantifiés. Chez les oiseaux, seuls des cas d'absence de changement et des changements mixtes ou non quantifiés ont été documentés.

Enfin, lorsque des données quantitatives sont disponibles, les distances auxquelles des effets sont observés (principalement pour les mammifères marins et les oiseaux) varient de quelques kilomètres à environ 70 km (pour le marsouin commun *Phocoena phocoena*, Bailey *et al.*, 2010), mais la majorité des études ne permet pas de caractériser précisément ces distances.

4. Incertitudes et lacunes de connaissances

- Les oiseaux et les poissons concentrent plus de la moitié des études ;
- Les connaissances aux deux extrêmes du continuum de la biodiversité (génétique d'un côté et écosystémique de l'autre) sont absentes ou sous-représentées ;

- Les changements d'aires de distribution, de connectivité et les distances d'effet sont rarement quantifiés ou mesurés, limitant notre évaluation de l'ampleur des effets à l'échelle du paysage ;
- Les espèces non indigènes sont très peu étudiées, malgré le rôle potentiel des éoliennes et des autres structures offshore dans leur propagation à grande échelle ;
- Les interactions entre parcs éoliens et aires marines protégées sont peu analysées, alors même que des chevauchements spatiaux importants existent, avec en moyenne 77% de la superficie des parcs présentant un statut d'aire protégée (tous niveaux de protection / de gestion confondus) ;
- Les effets liés à l'accumulation des différentes structures artificielles offshore (comme les plateformes pétrolières, gazières ou de recherche, les épaves, ou les bouées), c'est-à-dire à ceux relevant de la « trame grise », restent insuffisamment pris en compte.

5. Contextualisation des résultats à partir de la littérature complémentaire

À partir de l'analyse de la littérature complémentaire portant sur les effets des éoliennes en mer à l'échelle du paysage marin (8 articles, dont 2 de synthèse et 1 s'appuyant sur des analogues), trois messages principaux peuvent être dégagés. Premièrement, les effets observés à l'échelle du paysage marin sont variés et souvent complexes, notamment en raison de l'interaction avec d'autres activités humaines et de la coexistence de multiples pressions locales. Deuxièmement, les phénomènes d'expansion spatiale d'espèces indigènes comme non indigènes, bien qu'encore peu documentés dans cette littérature complémentaire, apparaissent comme un résultat récurrent dans les revues et articles analysés. Enfin, compte tenu des lacunes actuelles de connaissance, le recours à des analogues, tels que les plateformes offshore, pourrait constituer une piste pertinente pour anticiper, prévenir ou atténuer les effets des parcs éoliens à l'échelle du paysage.

MESSAGES-CLÉS

- Les effets des éoliennes en mer à l'échelle du paysage marin vont au-delà de la somme des effets locaux et traduisent des propriétés émergentes liées à l'accumulation spatiale des parcs ;
- Les changements d'abondance constituent l'effet le plus fréquemment documenté chez l'ensemble des groupes biologiques (à l'exception des céphalopodes, non étudiés), avec des diminutions observées principalement chez les oiseaux et les mammifères marins, tandis que des augmentations sont plus fréquemment rapportées chez les poissons et les macro-invertébrés ;
- Des changements de distribution, des modifications de connectivité et des phénomènes de débordement ou de pas japonais sont mis en évidence ;
- Les effets documentés concernent prioritairement des espèces protégées ou exploitées, reflétant un biais des efforts de recherche ;
- Les effets documentés concernent uniquement l'éolien posé (majoritairement en mer du Nord, dans des habitats sableux), ce qui met en évidence le manque de connaissances sur l'éolien flottant et le contexte méditerranéen, notamment dans des habitats rocheux ;
- Les lacunes de connaissance sont importantes, notamment concernant les effets à long terme, les effets sur les espèces non indigènes, ainsi que les interactions entre parcs et aires marines protégées, alors qu'en moyenne 77% de la superficie des parcs éoliens en mer présentent un statut d'aire protégée (tous niveaux de protection / de gestion confondus) ;
- La trame grise (ensemble des structures artificielles côtières et offshore) est largement sous-étudiée, y compris concernant ses effets sur la biodiversité et les socio-écosystèmes.

9. Introduction d'espèces non indigènes

1. Description de la pression et hypothèses d'effets

Les espèces non indigènes (ENI) correspondent à des organismes présents hors de leur aire de répartition initiale, à la suite d'une introduction liée aux activités humaines, volontaire ou fortuite. Leur introduction (dispersion primaire) peut résulter de plusieurs vecteurs bien identifiés en milieu marin, notamment le transport maritime (eaux de ballast, bio-encrassement des coques), l'aquaculture ou les infrastructures marines artificielles. En revanche, les espèces qui étendent leur aire de répartition, par exemple sous l'effet du changement climatique, ne sont pas considérées comme des ENI, contrairement aux espèces introduites qui se dispersent naturellement dans les zones voisines (dispersion secondaire).

Parmi les ENI, certaines peuvent devenir envahissantes et constituer une menace pour les écosystèmes et les espèces associées. Ces espèces sont reconnues comme l'une des causes majeures de l'érosion de la biodiversité et font l'objet de cadres réglementaires spécifiques aux niveaux international, européen et national.

Les éoliennes en mer peuvent interagir avec cette pression en créant de nouveaux habitats artificiels (effet récif) et en jouant un rôle de corridors de dispersion entre zones portuaires, côtières et offshore (effet de « pas japonais ») à des échelles allant du local au paysage marin. Les structures immergées constituent des supports de fixation favorables à l'installation d'organismes benthiques, dont la dispersion larvaire est facilitée par les courants. La taille et le nombre de parcs, ainsi que le contexte local (courants, habitats existants, diversité), influencent cette colonisation. Ces processus sont modulés par la présence préalable de vecteurs d'introduction.

Cadre analytique – Synthèse des effets potentiels associés à l'introduction d'espèces non indigènes induite par les éoliennes en mer (Figure 24)

- Des modifications de la diversité, de la densité et de la biomasse des espèces et des communautés présentes localement ;
- Des changements sur le fonctionnement de la dynamique des populations avec des modifications dans la distribution des espèces ;
- Des modifications des interactions écologiques, incluant la compétition, la prédation, le parasitisme et les relations trophiques ;
- Des modifications des habitats et du fonctionnement des écosystèmes ;
- Des effets indirects sur les activités humaines (disponibilité des espèces commerciales), susceptibles de rétroagir sur la biodiversité.

3. État des connaissances – Ce que dit la science

Les études disponibles montrent que les structures des éoliennes en mer constituent des habitats favorables à l'installation d'espèces non indigènes, en particulier dans les zones intertidales nouvellement créées par les fondations où elles manquent de concurrents indigènes.

Plusieurs travaux mettent en évidence la présence de l'ensemble des stades de développement de certaines ENI sur les pieds d'éoliennes, indiquant que ces structures peuvent soutenir leur cycle de vie complet. Par exemple, la présence du moucheron japonais (*Telmatogeton japonicus*), espèce probablement introduite via le transport maritime, a été observée à tous les stades de développement sur les substrats artificiels d'un parc éolien en mer (Brodin et Andersson, 2009). Cette espèce pourrait constituer une ressource alimentaire pour certaines espèces indigènes, notamment des oiseaux, sans que d'autres effets directs sur les espèces natives ne soient clairement établis.

Les résultats montrent également que les parcs éoliens peuvent jouer un rôle dans la distribution spatiale des ENI, notamment via des mécanismes de dispersion secondaire et d'effet de pas japonais. Des études sur des crustacés marins (Coolen *et al.*, 2016) indiquent que la caprelle japonaise (*Caprella mutica*), espèce non indigène envahissante, est principalement associée aux habitats intertidaux artificiels peu profonds, tandis que la caprelle commune (*Caprella linearis*), espèce indigène, occupe préférentiellement des habitats subtidaux plus profonds. Cette partition de l'habitat permet une coexistence partielle et limite la compétition directe entre l'espèce indigène et l'espèce non indigène envahissante.

À l'échelle des communautés, des travaux (De Mesel *et al.*, 2015) montrent que les fondations d'éoliennes peuvent être colonisées par un nombre significatif d'ENI, avec une proportion plus élevée en zone intertidale qu'en zone subtidale profonde. Ces résultats suggèrent que l'augmentation des substrats durs favorise l'installation d'ENI dans des habitats caractérisés par une faible compétition des espèces natives, entraînant des modifications de la composition des communautés.

En revanche, les effets directs clairement établis sur les espèces indigènes, tels que des déclin de populations ou des perturbations majeures des réseaux trophiques, ne sont pas mis en évidence de manière robuste au regard du peu de données actuellement disponibles.

4. Incertitudes et lacunes de connaissances

Les connaissances disponibles présentent des limites importantes au regard des résultats actuellement documentés, et appellent à une lecture prudente des effets potentiels des espèces non indigènes associées aux éoliennes en mer :

- Le nombre très limité d'études portant sur les conséquences de la dissémination d'espèces non indigènes (ENI) directement associées aux parcs éoliens en mer constitue une contrainte majeure pour l'évaluation des effets potentiels ;
- Les connaissances sont fortement concentrées sur la zone intertidale, tandis que les zones subtidales restent très peu documentées ;
- Les effets à l'échelle du paysage marin liés à la dispersion d'ENI, incluant la connectivité entre parcs et habitats artificiels, ne sont pas abordés ;
- Les dimensions génétiques et sanitaires (pathogènes, parasites) sont absentes des études directement liées aux parcs éoliens.

5. Contextualisation des résultats à partir de la littérature complémentaire

La littérature complémentaire mobilisée, portant sur des structures artificielles marines analogues (épaves, récifs artificiels, plateformes offshore et structures portuaires), permet de mettre en perspective les résultats observés sur les parcs éoliens en mer, dans un contexte où les données directement issues de ces parcs restent très limitées.

Cette littérature complémentaire comprend 19 articles correspondant à 34 études, dont 18 articles (30 études) portant sur des structures offshore isolées et 1 article (4 études) portant sur des structures portuaires. Les études concernent majoritairement des macro-invertébrés benthiques, avec une forte représentation du genre de coraux *Tubastrea*, ainsi que des travaux portant sur des mollusques et des crustacés.

Ces études montrent de manière convergente que les structures artificielles immergées constituent des habitats particulièrement favorables à l'installation et à la persistance d'ENI, notamment sur les substrats artificiels intertidaux, où la compétition avec les espèces natives est souvent réduite. Elles mettent en évidence le rôle de ces structures comme points d'ancrage permettant à certaines ENI d'assurer localement leur cycle de vie.

La littérature complémentaire souligne également le rôle des structures artificielles comme relais de dispersion, facilitant la propagation progressive d'ENI entre sites artificiels distants, et donc à l'échelle du paysage marin. Ces processus contribuent à des dynamiques de colonisation à plus large échelle, indépendamment des mécanismes d'introduction primaire.

Plusieurs études issues des analogues documentent des effets écologiques mesurables, principalement liés à la compétition pour l'espace, se traduisant par des réductions locales de diversité, de densité ou de biomasse des communautés natives. Une seule étude (Gardner, 2016) met également en évidence un risque d'hybridation entre une espèce native et une espèce non indigène de moule, soulignant un potentiel de modification du patrimoine génétique des populations locales.

Dans l'ensemble, cette littérature complémentaire montre que les processus observés sont cohérents avec ceux documentés sur d'autres infrastructures artificielles marines, tout en soulignant que les effets décrits concernent davantage des changements de répartition et de structure des communautés que des effets globaux clairement quantifiés.

MESSAGES-CLÉS

- Les éoliennes en mer peuvent faciliter l'installation locale d'espèces non indigènes telles que le moucheron japonais (*Telmatogeton japonicus*), dont certaines sont envahissantes, comme la caprelle japonaise (*Caprella mutica*), en particulier sur les substrats artificiels intertidaux en l'absence de concurrents natifs ;
- Les observations réalisées sur les parcs éoliens sont cohérentes avec celles issues d'autres structures artificielles marines, qui montrent un rôle de support d'installation et de relais de dispersion pour certaines ENI ;
- Les effets documentés concernent principalement des modifications de la composition des communautés et des dynamiques de répartition sans que le sens des effets ne soit clairement établi ;
- Les effets directs des espèces non indigènes établies sur les parcs éoliens sur les espèces indigènes sont peu documentés et demeurent à démontrer, sans que leur existence puisse pour autant être exclue ;
- Les effets en zones subtidales, les effets à long terme, les effets cumulés, ainsi que les dimensions génétiques (hybridation et composition génétique des populations) et sanitaires (pathogènes, parasites) demeurent largement inconnus ;

- Les résultats doivent être interprétés avec prudence, en tenant compte du rôle cumulatif des infrastructures artificielles marines (effet de relais de dispersion et effet de « pas japonais ») et de la présence de l'ensemble des vecteurs d'introduction des espèces non indigènes.

10. Modification des activités de pêche

1. Description de la pression et hypothèses d'effets

La réduction ou l'interdiction de certaines activités humaines à l'intérieur des parcs peut modifier indirectement la biodiversité marine, lorsque l'implantation de parcs éoliens conduit à limiter certains usages. Parmi ces activités figurent notamment certaines pratiques de pêche professionnelle et récréative. Dans ce contexte, l'« effet réserve » désigne l'ensemble des réponses écologiques observées à la suite de la réduction ou de la suppression des activités de prélèvement biologique au sein d'un espace marin donné. Ce concept est historiquement issu de la littérature sur les aires marines protégées (AMP), et plus particulièrement sur les zones de non-prélèvement (« no-take zones »). De nombreuses synthèses et méta-analyses ont montré que l'effet réserve peut se traduire par des augmentations de la biomasse, de l'abondance et de la taille moyenne des individus, ainsi que, dans certains cas, de la richesse spécifique.

Les mécanismes à l'origine de l'effet réserve sont multiples. La mortalité liée aux activités de pêche est réduite de façon directe. L'effet refuge est lié au fait que les espèces pêchées trouvent un abri dans des zones où les perturbations physiques sont moindres, en particulier celles associées aux engins de pêche traînants. À moyen et long terme, ces processus peuvent favoriser la restauration des interactions trophiques et conduire à des cascades écologiques. Lorsque la capacité de charge — c'est-à-dire la taille maximale d'une population qu'un milieu donné peut supporter — est atteinte, ou que les espèces présentent une forte mobilité, un effet de débordement (« *spill-over* ») vers les zones adjacentes peut également se produire (Figure 25). Cela entraîne généralement une redistribution de l'effort de pêche en bordure des aires marines protégées, pouvant ainsi contribuer au soutien des activités de pêche artisanale. Pour les espèces à forte mobilité, des aires marines protégées situées à proximité — parfois distantes de plusieurs dizaines de kilomètres — peuvent être utilisées comme zones de refuge, d'alimentation ou de reproduction. Dans cette perspective, les aires marines protégées peuvent être envisagées comme un réseau, au sein duquel la connectivité écologique joue un rôle déterminant dans le maintien et la dynamique des populations.

Dans le cas des parcs éoliens en mer, l'effet réserve ne constitue pas un objectif explicite de gestion, mais pourrait néanmoins émerger de manière indirecte lorsque des restrictions d'usages sont mises en place. La limitation, voire l'exclusion, de certaines pratiques de pêche, en particulier le chalutage de fond, pourrait réduire localement la pression halieutique et conférer à ces zones certaines caractéristiques de secteurs faisant l'objet de mesures de gestion ou de protection. Cette activité n'est pas la seule à être modifiée par la présence d'un parc éolien. D'autres usages peuvent également se retrouver *de facto* exclus, comme par exemple l'extraction de granulats marins (MMO, 2023). Toutefois, la littérature scientifique analysée dans le cadre de la revue systématique porte uniquement sur les changements d'activité liés à la pêche. L'expertise a donc choisi de concentrer l'analyse détaillée sur cette activité, qui constitue à ce jour le seul changement d'usage documenté dans la littérature scientifique.

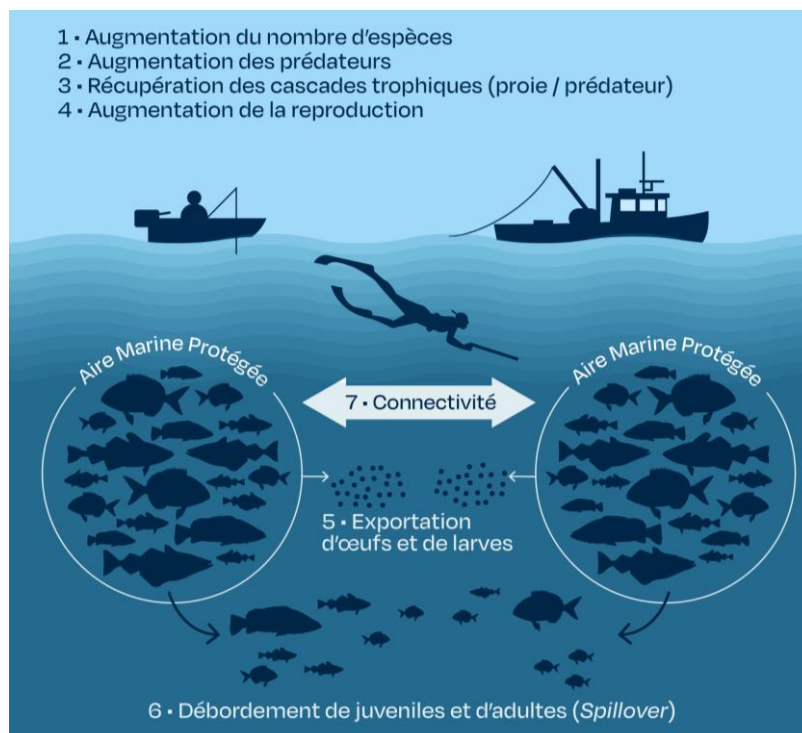


Figure 25. Description chronologique des effets (1 à 7) consécutifs à la mise en protection d'une aire marine protégée, résultant de la réduction de la pression de prélèvement par les pêches professionnelle et récréative (d'après B. Hereu, Interreg POCTEFA RESMED+).

Cadre analytique – Synthèse des effets potentiels (4 mécanismes) associés à la restriction des activités de pêche au sein des parcs éoliens en mer (Figure 26)

- La reconstitution des communautés benthiques sensibles aux perturbations physiques liées aux activités de pêche ;
- Le rétablissement des populations d'espèces halieutiques exploitées ;
- La réorganisation des réseaux trophiques et de certaines fonctions écologiques ;
- L'émergence d'effets de débordement (« *spill-over* ») susceptibles de bénéficier aux pêcheries adjacentes.

Les effets potentiels sont attendus à des échelles spatiales variables mais de proximité, allant des limites du parc aux zones adjacentes, et selon des temporalités qui varient en fonction des groupes biologiques concernés.

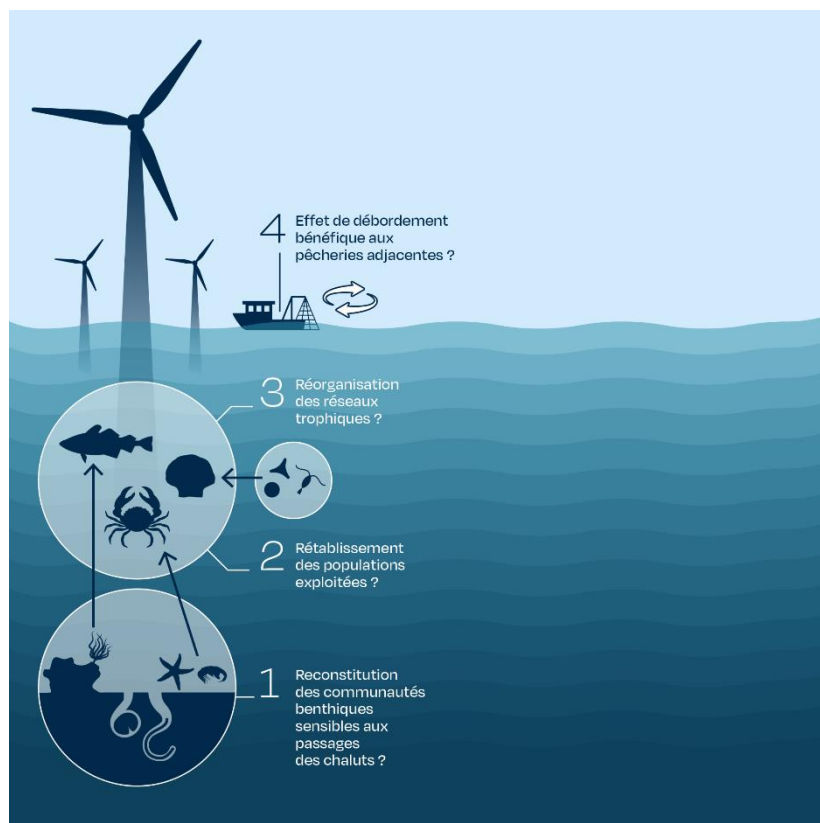


Figure 26. Synthèse des effets potentiels associés à la restriction des activités de pêche au sein des parcs éoliens en mer.

2. Description du corpus de la revue systématique

Le corpus spécifiquement consacré à l'effet réserve associé aux parcs éoliens en mer demeure, à ce stade, limité. Les travaux analysés regroupent 13 articles scientifiques publiés entre 2011 et 2024, correspondant à 22 études distinctes, ce qui reflète un intérêt scientifique encore émergent pour cette thématique.

La dynamique temporelle des publications montre une progression lente mais régulière, avec en moyenne moins d'un article par an. Cette faible densité contraste fortement avec l'abondance de la littérature consacrée aux aires marines protégées, pour lesquelles plusieurs centaines de publications documentent l'effet réserve.

Les études disponibles sont majoritairement localisées en Europe du Nord (mer du Nord et Manche), dans des contextes réglementaires contrastés concernant l'exercice de la pêche au sein des parcs éoliens en mer. Sur les 13 articles analysés, 9 renseignent explicitement le régime de pêche applicable. Parmi eux, 3 concernent des parcs soumis à une interdiction stricte de la pêche (Belgique et Allemagne) ; 3 analysent, à travers des travaux de modélisation menés dans la baie de Seine, des scénarios d'interdiction partielle des activités de pêche, dans lesquelles une partie de la surface du parc est fermée à certaines pratiques, ou, pour l'un d'entre eux, un scénario de fermeture totale ; 2 étudient des parcs où le chalutage est interdit tandis que les activités de pêche recourant aux arts dormants demeurent autorisées (Belgique et Pays-Bas) ; enfin 1 porte sur un parc faisant l'objet d'une interdiction temporaire limitée à la phase de construction (Royaume-Uni). Ces situations diffèrent du cadre réglementaire prévu pour les parcs éoliens en mer en France, ce qui doit être pris en compte dans l'interprétation des résultats.

Sur le plan méthodologique, la plupart des travaux reposent sur des dispositifs comparatifs de type avant/après, intérieur/extérieur, ou sur une combinaison de ces approches. Les EBV les plus fréquemment mobilisées concernent la biomasse, l'abondance et la densité des organismes. En revanche, les variables décrivant plus finement le fonctionnement écologique — telles que la taille individuelle, la diversité ou les traits écologiques — sont plus rarement prises en compte.

3. État des connaissances - Ce que dit la science

Malgré le nombre limité d'études disponibles, plusieurs résultats convergents peuvent être dégagés. Les travaux réalisés mettent en évidence une augmentation de l'abondance et de la biomasse des macro-invertébrés benthiques, en particulier des espèces sensibles au chalutage de fond (Coates *et al.*, 2016 ; Roach *et al.*, 2018). Ces augmentations sont observées de manière cohérente à l'intérieur des parcs éoliens où la pêche est interdite et sont généralement absentes dans les zones extérieures, ce qui suggère un effet lié à la réduction de la pression de pêche.

Pour les espèces halieutiques exploitées, les réponses apparaissent plus hétérogènes. Certaines études mettent en évidence des augmentations locales d'abondance ou de taille moyenne pour des espèces commerciales telles que le homard (*Homarus gammarus*) ou la plie commune (*Pleuronectes platessa*) (Krone *et al.*, 2017 ; Buyse *et al.*, 2022 ; 2023). D'autres travaux montrent des réponses variables selon les sites, les saisons et l'ancienneté des parcs (Vandendriessche *et al.*, 2015). L'augmentation de la taille moyenne des individus constitue l'un des principaux indicateurs mobilisés pour caractériser un effet lié à la baisse de la pression de pêche, cette variable étant classiquement utilisée pour évaluer l'efficacité des aires marines protégées.

Les poissons mobiles présentent des réponses contrastées, avec, selon les espèces et les contextes, des augmentations, des diminutions ou l'absence de signal détectable. La forte mobilité de certaines espèces, dont l'aire de répartition dépasse largement la superficie des parcs étudiés, complique l'attribution des changements observés à un effet réserve local. La jeunesse relative des parcs analysés, généralement inférieure à dix ans, constitue également un facteur limitant pour l'interprétation des résultats.

Les effets trophiques restent encore peu documentés par des études de terrain. Quelques approches de modélisation suggèrent néanmoins des réorganisations potentielles des réseaux trophiques et une augmentation des captures de différentes espèces exploitées par les pêcheries à proximité des parcs, compatibles avec l'hypothèse d'un effet de débordement modéré (Raoux *et al.*, 2018 ; Halouani *et al.*, 2020) (Figure 27).

L'effet de débordement est principalement documenté à ce jour par des travaux de modélisation (Halouani *et al.*, 2020 ; Stelzenmuller *et al.*, 2021). Les observations de terrain disponibles ne permettent toutefois pas encore de mettre clairement en évidence cet effet. De Backer *et al.* (2019) montrent notamment que les flottilles exclues des zones de parcs éoliens poursuivent généralement leurs activités de pêche en périphérie immédiate des parcs, suggérant une disponibilité locale de la ressource, sans réorganisation majeure des zones exploitées ni déplacement des activités de pêche sur de longues distances. Vandendriessche *et al.* (2015) soulignent ainsi la nécessité de poursuivre les suivis à long terme afin de mieux caractériser et quantifier les éventuels effets de débordement.

Enfin, les travaux de Buyse *et al.* (2023), fondés sur des approches de télémétrie, montrent que les plies (*Pleuronectes platessa*) utilisent l'intérieur des parcs éoliens comme zone d'alimentation avant de les quitter au moment de la reproduction. Les déplacements observés hors du parc semblent principalement associés à la recherche de sites de reproduction et pourraient ainsi participer à une dynamique de débordement des individus vers les zones périphériques. Cette étude a été conduite au sein du parc éolien en mer de Belwind (mer du Nord belge) où les activités de pêche sont interdites.

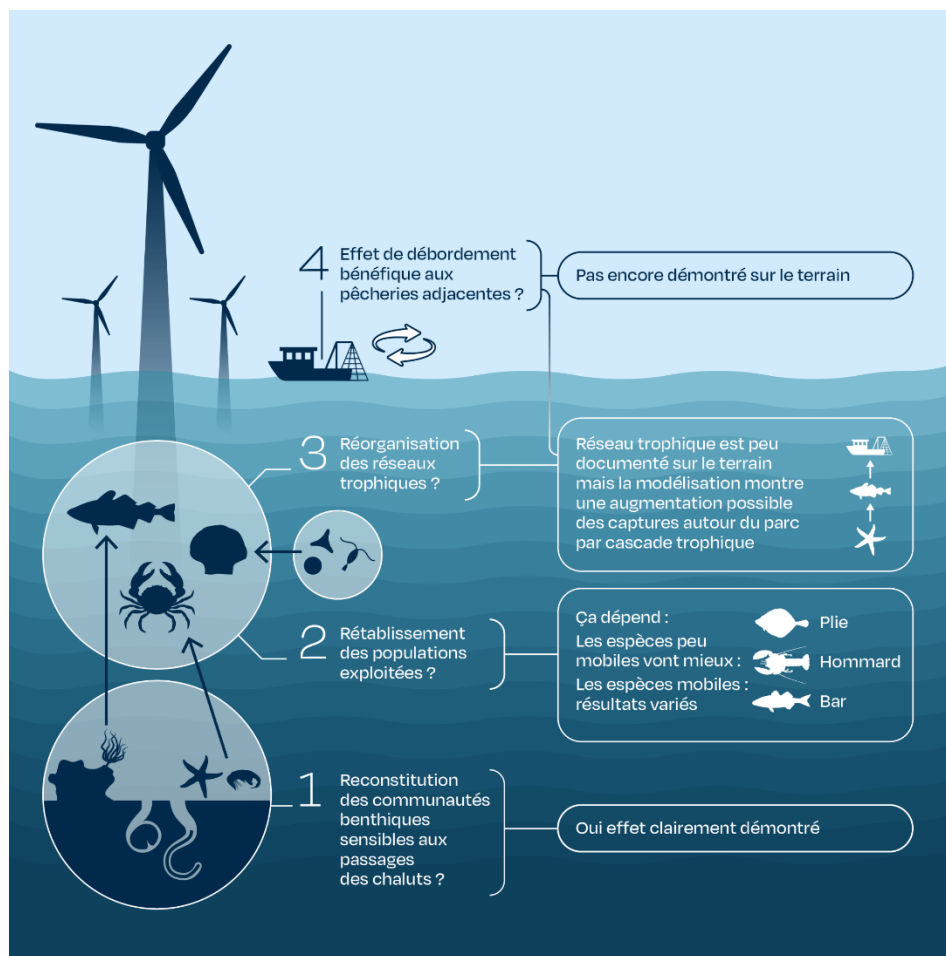


Figure 27. Synthèse des effets documentés associés à la restriction des activités de pêche au sein des parcs éoliens en mer.

4. Incertitudes et lacunes de connaissances

Les résultats disponibles doivent être interprétés à la lumière de plusieurs limites et incertitudes :

- La faiblesse du corpus scientifique disponible, avec un nombre limité d'études spécifiquement consacrées à l'effet réserve associé aux parcs éoliens en mer ;
- La sous-représentation de nombreux groupes biologiques, notamment les poissons pélagiques, les prédateurs supérieurs, le plancton, le meiobenthos (organismes benthiques de petite taille, < 1 mm) et les macro-algues ;
- La rareté des approches intégrées à l'échelle de l'écosystème, alors que l'effet réserve repose sur des processus multi-trophiques complexes ;
- La discussion scientifique sur la possibilité de considérer les parcs éoliens en mer comme des aires marines protégées, alors même que ces infrastructures n'ont pas été conçues comme des outils de conservation.

5. Contextualisation des résultats à partir de la littérature complémentaire

Afin de replacer les résultats documentés dans un cadre plus large, une littérature complémentaire a été mobilisée. Celle-ci inclut des études issues de la littérature institutionnelle, des travaux récents non couverts par le corpus

issu de la revue systématique, ainsi que la littérature abondante consacrée à l'effet réserve dans les aires marines protégées. Les synthèses et méta-analyses existantes constituent des références clés pour comprendre les mécanismes généralement associés à la réduction des prélèvements biologiques (Halpern et Warner, 2002 ; Lester *et al.*, 2009 ; Sala et Giakoumi, 2018).

Des travaux récents, publiés sous forme de rapports ou d'articles scientifiques et menés sur des parcs éoliens en mer, notamment en mer du Nord, apportent des éléments empiriques complémentaires. Ils mettent en évidence des effets refuge ainsi que des modifications comportementales chez certaines espèces commerciales (De Backer *et al.*, 2019 ; 2020 ; Buyse *et al.*, 2025). Ces observations suggèrent un effet combiné entre la protection liée aux restrictions d'usages et les modifications d'habitats associées aux structures éoliennes (effet récif). Ces travaux sont étayés par les études de modélisation des réseaux trophiques, qui montrent que la faune des substrats durs introduits constitue également une proie pour plusieurs espèces de poissons (De Borger *et al.*, 2025). La littérature relative aux aires marines protégées souligne par ailleurs le rôle de plusieurs facteurs déterminants dans l'émergence d'un effet réserve marqué, tels qu'une surface protégée suffisante, l'ancienneté de la protection, l'interdiction effective des prélèvements et la bonne application des règles (Claudet *et al.*, 2010 ; Edgar *et al.*, 2014). Transposés au contexte des parcs éoliens en mer, ces enseignements suggèrent que l'intensité de l'effet réserve dépend fortement du niveau réel de restriction des activités de pêche.

Les travaux portant sur les récifs artificiels rappellent toutefois que les augmentations locales d'abondance observées autour de structures peuvent relever d'un simple effet d'agrégation, sans nécessairement traduire un rétablissement des populations (Bohnsack, 1989). Gill *et al.* (2020) soulignent que, si des effets individuels locaux sont documentés, il existe très peu de preuves d'effets à l'échelle des populations ou de bénéfices réels pour la pêche. Lipsky *et al.* (2025) mettent en évidence que l'expansion massive de l'éolien en mer crée un conflit spatial avec les relevés scientifiques et alertent sur les conséquences potentielles pour la capacité des scientifiques à suivre et à gérer les ressources.

Enfin, la transposabilité des résultats aux eaux françaises doit être envisagée avec prudence. Le cadre national français privilégie une approche de co-activité visant à maintenir certaines pratiques de pêche au sein des parcs éoliens en mer, ce qui est susceptible de limiter l'ampleur de l'effet réserve. De plus, la diversité écologique et socio-économique des façades maritimes françaises rend toute généralisation délicate. Dans certains contextes, notamment en Méditerranée — mer semi-fermée caractérisée par une forte biodiversité et des pressions anthropiques élevées — plusieurs travaux plaident pour une approche intégrée et prudente lors de la planification spatiale maritime (Lloret *et al.*, 2023 ; Wawrzynkowski, 2025). Dans cette perspective, Wawrzynkowski *et al.* (2026) suggèrent de ne pas implanter de parcs éoliens en mer au sein des aires marines protégées, afin de limiter les risques écologiques potentiels.

MESSAGES-CLÉS

- Existence d'un effet réserve potentiel : les parcs éoliens en mer peuvent générer un effet réserve indirect lorsque certaines activités de pêche, en particulier le chalutage de fond, sont réduites ou interdites ;
- Robustesse variable selon les groupes biologiques : les signaux les plus robustes concernent le macro-benthos, tandis que les réponses des poissons apparaissent plus variables et dépendent largement de l'ancienneté des parcs et des contextes locaux ;
- Rôle déterminant des modalités de gestion : le niveau réel de restriction de la pêche conditionne l'intensité de l'effet réserve observé au sein des parcs ;
- Importance des délais de réponse : des effets comparables à ceux observés dans les aires marines protégées nécessitent souvent un délai de plusieurs années (5 à 10 ans) après la mise en place des restrictions de pêche ;
- Manque de données à long terme : l'absence de suivis standardisés et de longue durée constitue une limite majeure pour apprécier la réalité et l'ampleur des effets observés, qui doivent être mis en perspective au regard de l'aire de répartition totale des populations concernées par les parcs éoliens ;

- Interaction avec l'effet récif : les augmentations locales d'abondance observées sur les monopiles doivent être interprétées avec prudence, afin de distinguer effet refuge, phénomène d'agrégation et restauration effective des populations. Ces questions devront également être étudiées pour les structures de type jacket et les éoliennes flottantes, pour lesquelles aucun résultat n'est disponible à ce jour ;
- Transposabilité limitée aux contextes français : les choix de co-activité ainsi que la diversité écologique et socio-économique des façades maritimes françaises limitent la transférabilité directe des résultats issus d'autres régions. Les discussions sur ces questions demeurent toutefois ouvertes ;
- Besoin de recherches holistiques : le développement d'approches couvrant l'ensemble des niveaux trophiques, écosystémiques et socio-écologiques apparaît nécessaire pour mieux éclairer la planification spatiale maritime ;
- Parcs éoliens et aires marines protégées : les parcs éoliens en mer ne peuvent être assimilés à des aires marines protégées, mais peuvent représenter des éléments complémentaires dans une stratégie globale de gestion de l'espace marin (Roach *et al.*, 2018).

PARTIE 4

**Mesures d'atténuation et
enjeux transverses (cumul
d'effets, incertitudes,
transposabilité)**

1. Mesures d'atténuation des effets environnementaux et propositions d'améliorations socio-écologiques

1. Les mesures d'atténuation des effets

Le développement des parcs éoliens en mer s'accompagne de pressions susceptibles d'interagir avec les milieux et les espèces, à différentes phases des projets et à différentes échelles. Les mesures d'atténuation visent à agir sur les effets négatifs environnementaux associés à ces projets — c'est-à-dire ceux identifiés comme préjudiciables et devant être évités. En France, ces effets sont recensés lors de la réalisation des études d'impact sur l'environnement (ou études d'incidence), dans le cadre de la séquence hiérarchique Éviter – Réduire – Compenser (ERC) :

- L'évitement vise à supprimer les effets négatifs notables, par exemple par le choix de zones éloignées des routes migratoires, des zones de reproduction ou des habitats fragiles ;
- La réduction concerne la diminution des effets qui n'ont pas pu être évités, par exemple à travers l'usage de technologies limitant le bruit, la planification des activités en dehors des périodes sensibles du cycle de vie des espèces, ou une conception des ouvrages minimisant l'affouillement ;
- La compensation intervient sur les effets négatifs résiduels notables subsistants après l'évitement et la réduction, notamment via la restauration par équivalence biophysique d'habitats, d'espèces ou de fonctions écologiques dégradés à proximité.

Une fois le projet en exploitation, le suivi permet d'évaluer l'efficacité des mesures d'atténuation, voire de les corriger *ex post*, sur toute la durée d'exploitation des ouvrages.

Une synthèse des mesures d'atténuation étudiées dans la littérature scientifique et associées aux parcs éoliens en mer est ici proposée, en précisant les pressions concernées, les groupes biologiques ciblés, ainsi que les contextes techniques et géographiques étudiés. Deux types de mesures sont distingués : celles qui ont été testées sur le terrain, c'est-à-dire mises en œuvre directement au sein des parcs éoliens, et celles proposées dans la littérature mais non testées en conditions réelles. Leur positionnement est analysé par rapport à la séquence ERC (Éviter, Réduire, Compenser) et/ou aux approches socio-écologiques émergentes, sans pour autant évaluer leur efficacité.

Dans cette section, les qualificatifs de « négatif » ou de « positif » sont employés en référence au cadre réglementaire associé à la séquence ERC et aux procédures d'évaluation environnementale, centrées sur l'identification et le traitement des incidences notables sur l'environnement. Cet usage ponctuel se distingue de l'approche générale retenue dans le reste de l'expertise, qui privilégie une caractérisation descriptive et non normative des effets rapportés dans la littérature scientifique.

2. Description du corpus de la revue systématique

Le corpus de la revue systématique analysé comprend 100 articles correspondant à 115 études portant sur les mesures d'atténuation socio-écologiques associées aux parcs éoliens en mer.

Sur le plan géographique, les études concernent 18 pays, avec une forte concentration au Royaume-Uni, en Allemagne et aux États-Unis. Les éco-régions les plus représentées sont la mer du Nord et l'Atlantique Nord. Le nombre d'études augmente fortement à partir de 2019, avec un pic observé en 2023, traduisant une structuration récente mais rapide de ce champ de recherche.

Enfin, sur le plan méthodologique, environ 60 % des études reposent sur des données *in situ*, tandis que 31 % mobilisent des approches de modélisation. Les approches *ex situ* et participatives restent plus marginales, représentant respectivement 4 % et 5 % des études.

Les variables essentielles de la biodiversité analysées concernent principalement les populations et les traits biologiques. Les approches portant sur les communautés et les écosystèmes restent très minoritaires, ce qui limite la capacité à appréhender les effets des mesures à des niveaux d'organisation plus globaux.

Les travaux recensés dans la littérature scientifique sur les mesures d'atténuation présentent une forte concentration sur certains groupes biologiques. Les mammifères marins représentent à eux seuls plus d'un tiers des études (36,5 %), tandis que les oiseaux en représentent près d'un quart (24,3 %). Ensemble, ces deux groupes concentrent plus de 60 % du corpus. Les autres composantes de la biodiversité sont beaucoup moins étudiées : les macro-invertébrés benthiques, les réseaux trophiques et les poissons apparaissent de manière plus marginale, tandis que les chiroptères, les céphalopodes et les autotrophes sont très peu présents dans les travaux recensés.

Ce corpus s'intéresse peu aux espèces considérées comme prioritaires pour la conservation : seules 21 % des études portent sur des espèces classées comme menacées (UICN). Le marsouin commun (*Phocoena phocoena*) est l'espèce la plus étudiée. À l'inverse, les études portant sur les poissons incluent plus fréquemment des espèces menacées, mais présentant un intérêt commercial, comme l'esturgeon ou le cabillaud.

3. État des connaissances – Ce que dit la science

Les 115 études recensées décrivent un ensemble structuré de mesures d'atténuation qui se répartissent en trois grandes catégories : mesures techniques, mesures de gestion et mesures de planification (Figure 28).

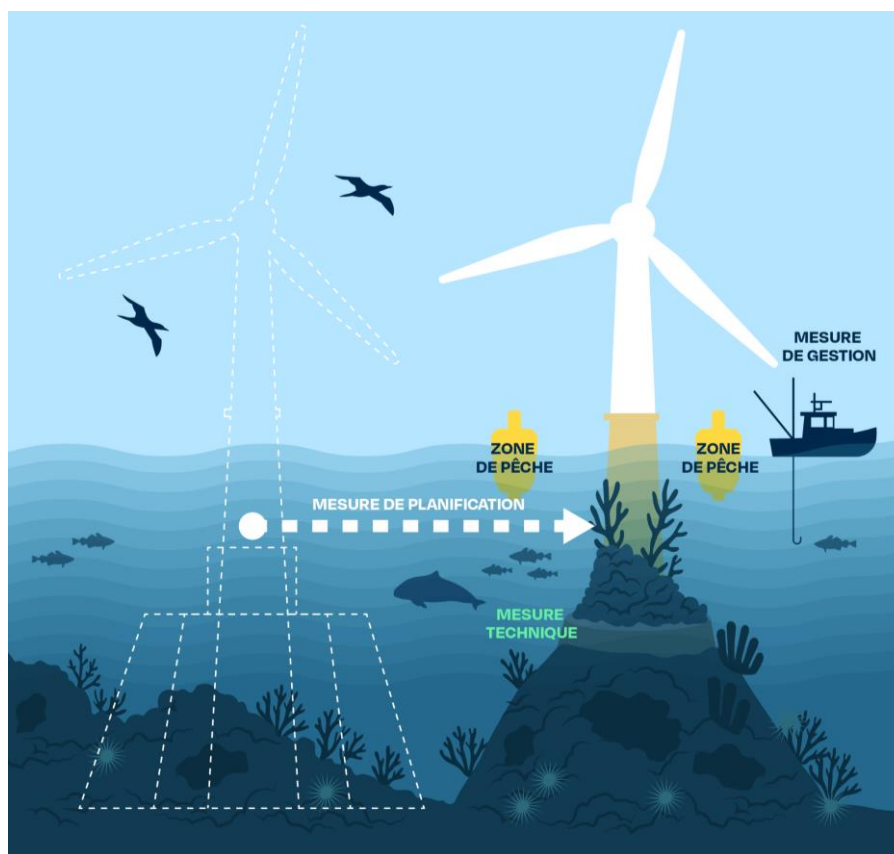


Figure 28. Illustration des trois types de mesures d'atténuation identifiées dans la littérature scientifique : planification (ex. éviter les zones d'intérêt écologique ou les couloirs de migration des oiseaux), techniques (ex. éco-conception des structures sous-marines, amélioration de la visibilité des pales) et gestion (ex. co-usage des espaces et arrêt des machines par bridage planifié sur certaines périodes : migration, reproduction, etc.).

Le corpus identifie au total 76 mesures techniques, 55 mesures de gestion et 33 mesures de planification. Cette répartition indique que les mesures techniques portant sur le design des infrastructures, avec par exemple des adaptations de conception structurelles des fondations, ou destinées à limiter certaines perturbations physiques,

dominent largement dans la littérature. Les leviers qui relèvent davantage de décisions à l'échelle de la planification territoriale sont nettement moins documentés. Cette typologie montre que les réponses scientifiques étudiées, face aux effets négatifs associés aux parcs éoliens en mer, reposent principalement sur des leviers techniques, davantage que sur des mesures stratégiques de planification ou de gestion prises en amont des projets.

Lorsque les mesures sont reclassées selon les définitions Éviter - Réduire - Compenser (75 mesures identifiées), le déséquilibre apparaît particulièrement marqué :

- 2 mesures d'évitement (moins de 3%), uniquement en Planification ;
- 64 mesures de réduction (85%), principalement Technique (43), de Planification (11) et de Gestion (10) ;
- 9 mesures de compensation (12%), Technique (5) et de Gestion (4).

Les mesures recensées concernent majoritairement les mammifères marins et les oiseaux. Cette structuration du corpus a une conséquence directe sur la nature des mesures étudiées, qui portent principalement sur certaines pressions et certains types d'interactions, tandis que d'autres composantes de la biodiversité marine restent très peu prises en compte dans les stratégies analysées.

Les pressions ciblées par ces mesures sont, de manière très majoritaire, les émissions sonores et les structures agissant comme obstacles physiques au déplacement. La quasi-totalité des études portant sur les mammifères marins, ainsi que l'ensemble de celles consacrées aux céphalopodes, concernent des mesures visant à atténuer les émissions de bruit. Les études portant sur les oiseaux et les chiroptères sont, quant à elles, presque exclusivement associées à la pression liée aux structures aériennes des éoliennes en tant qu'obstacles physiques au déplacement. À l'inverse, la partie immergée des éoliennes est très rarement considérée comme un obstacle dans les dispositifs étudiés. D'autres types d'effets associés aux parcs éoliens en mer — comme les modifications d'habitats, les effets à l'échelle des communautés, les dynamiques trophiques ou les effets cumulés à grande échelle — sont très peu pris en compte dans les mesures d'atténuation analysées.

Un enseignement central concerne le niveau de validation des mesures proposées. En effet, 66 % des mesures recensées ne sont pas testées. Elles correspondent à des propositions formulées dans la littérature, à des recommandations ou à des pistes discutées de manière conceptuelle, sans qu'elles aient fait l'objet d'une évaluation *in situ* en conditions réelles. Les 34 % restantes, testées ou évaluées empiriquement, concernent très majoritairement des solutions techniques, plus rarement des mesures de gestion et très exceptionnellement des mesures de planification (Tableau 3).

En synthèse, les études relatives aux mesures d'atténuation, reclassées selon la séquence réglementaire ERC, montrent que le volet Éviter porte principalement sur l'évitement spatial, à travers le recours à la cartographie de haute précision (« *micro-siting* ») afin de préserver les habitats benthiques sensibles. À l'échelle régionale (« *macro-siting* »), elles suggèrent également d'implanter les parcs en dehors des zones de forts courants ou de sensibilité acoustique élevée pour les mammifères marins.

Pour le volet Réduction, les recherches consacrées à l'avifaune et aux chiroptères portent principalement sur l'augmentation du tirant d'air sous les pales (30 m) et l'espacement des turbines (2 à 3,5 km) afin de tenter de limiter les collisions. Les mesures opérationnelles étudiées incluent le « *curtailment* » (arrêt temporaire des pales par bridage) lors des pics migratoires, l'augmentation de la vitesse minimale du vent nécessaire au déclenchement de la rotation des pales (« *cut-in speed* » portée à 5 m/s) afin d'éviter leur mise en mouvement lorsque les conditions sont favorables aux déplacements de certaines espèces, ainsi que des expérimentations sur des dispositifs d'éclairage intelligent (« *command and control* ») ou sur des spectres lumineux spécifiques (rouge, UV) afin de diminuer l'attraction. L'amélioration du contraste visuel des pales par des motifs achromatiques est également documentée comme pouvant accroître leur détectabilité. Toutefois, les effets potentiels de l'augmentation de l'espacement entre les turbines demeurent à considérer avec prudence, dans la mesure où une emprise spatiale plus importante des parcs pourrait également conduire à une perte ou une fragmentation accrue des habitats pour certaines espèces.

Les études portant sur la réduction des émissions acoustiques sous-marines préconisent une approche multicouche, combinant une réduction à la source — par le recours à des fondations gravitaires ou flottantes plutôt qu’au battage — et des dispositifs d’atténuation active tels que les rideaux de bulles ou les écrans de type « *Hydro Sound Damper* ». Le déploiement de procédures de « *soft start* » et de dispositifs de dissuasion acoustique est également considéré comme favorable afin de permettre l’éloignement préalable des mammifères marins.

Concernant les champs électromagnétiques, l’enfouissement des câbles (1 à 2 m) et l’utilisation de courants triphasés alternatifs sont les principales mesures de réduction proposées.

Enfin, pour le volet Compensation, les travaux se concentrent principalement sur l’effet récif, à travers l’éco-conception (« *Nature Inclusive Design* ») des infrastructures sous-marines. Par exemple, l’utilisation de matériaux adaptés pour les protections anti-affouillement peut favoriser l’installation d’espèces cibles, telles que l’huître indigène *Ostrea edulis*. L’intégration de structures favorables à la biodiversité, associée à une gestion du parc inspirée de celle des aires marines protégées — notamment via la régulation de certaines activités de pêche — est également étudiée afin de restaurer la biomasse et de soutenir les interactions trophiques, en appui à une planification spatiale maritime plus intégrée. Enfin, certaines études proposent d’étendre les mesures compensatoires à terre, par la création de zones protégées ou le contrôle non létal des prédateurs de colonies d’oiseaux marins, c’est-à-dire de mesures permettant de limiter l’action des prédateurs sans les tuer, dans le but de protéger les oiseaux marins.

Pression	Description des mesures d’atténuation testées ou évaluées
Structures en tant qu’obstacle physique au déplacement (effet collision et effet barrière)	Oiseaux : - Arrêt périodique des pales à certaines heures ou périodes de l’année, notamment lors des périodes de migration ou en conditions météorologiques défavorables ; arrêt déclenché en cas de détection des individus (« command and control ») : Lagerveld <i>et al.</i>, 2023. - Augmentation de la vitesse minimale du vent nécessaire au déclenchement de la rotation des pales (« cut-in speed » portée à 5 m/s) afin d’éviter leur mise en mouvement lorsque les conditions sont favorables aux déplacements de certaines espèces : Lagerveld <i>et al.</i>, 2021. - Réduction de l’intensité de la lumière de signalisation des éoliennes : Heinänen <i>et al.</i>, 2020. - Utilisation de lumières dans les spectres violet et ultraviolet afin de dissuader les oiseaux de s’approcher des zones éclairées : May <i>et al.</i>, 2017. Chiroptères : - Arrêt périodique des pales à certaines heures ou périodes de l’année, notamment lors des périodes de migration ou en conditions météorologiques défavorables ; arrêt déclenché en cas de détection des individus (« command and control ») : Lagerveld <i>et al.</i>, 2023. - Interdiction de mise en rotation des pales lorsque la vitesse du vent est inférieure à 5 m/s (« cut-in speed ») : Lagerveld <i>et al.</i>, 2021. Mammifères marins : - Arrêt des travaux de construction du parc à certaines périodes de l’année : Leiter <i>et al.</i>, 2017.
Introduction de substrats durs artificiels	Macrofaune benthique : - Choix du revêtement des fondations, notamment de revêtements céramiques, afin de limiter la formation de biofilms : Sanz <i>et al.</i>, 2024. - Installation de protections contre l’affouillement autour des fondations des turbines, afin de favoriser la fixation des macro-invertébrés benthiques ou de limiter la remise en suspension des sédiments : ter Hofstede <i>et al.</i>, 2024. - Prise en compte de la conception et des caractéristiques de construction des infrastructures afin d’influencer leur fonctionnement en tant que récifs artificiels : Werner <i>et al.</i>, 2024.
Modification des habitats benthiques	Macrofaune benthique : - Réalisation d’une cartographie de haute précision afin de positionner individuellement les éoliennes au sein du parc dans les zones les moins sensibles (micro-siting) : Guarinello <i>et al.</i>, 2022 ; Pearce <i>et al.</i>, 2014. - Introduction de larves d’huîtres afin de favoriser la fixation et le développement d’huîtres natives présentes avant l’installation du parc : ter Hofstede <i>et al.</i>, 2024. Poissons : - Adaptation du calendrier des opérations d’enfouissement des câbles afin de limiter les perturbations sur les poissons : Hammar <i>et al.</i>, 2014.

Émissions sonores	Mammifères marins : - Arrêt des travaux de construction du parc à certaines périodes de l'année : Leiter <i>et al.</i>, 2017 ; Quintana-Rizzo <i>et al.</i>, 2021. - Mise en place de barrières acier/air ou de rideaux de bulles afin d'atténuer les émissions sonores sous-marines : Sigray <i>et al.</i>, 2022. - Définition d'un rayon de prévention de 1,9 km autour de la source de bruit : Huang <i>et al.</i>, 2023. - Utilisation de dispositifs acoustiques de dissuasion (« <i>acoustic deterrent devices</i> ») avant les phases de construction : Thompson <i>et al.</i>, 2020. - Utilisation de dispositifs acoustiques de dissuasion (« <i>acoustic deterrent devices</i> ») : Graham <i>et al.</i>, 2019. - Utilisation de dispositifs acoustiques de dissuasion pour les marsouins (« <i>acoustic porpoise deterrents</i> ») et de dispositifs acoustiques de harcèlement (« <i>acoustic harassment devices</i> ») lors des travaux de construction : Voß <i>et al.</i>, 2023. - Utilisation d'effaroucheurs acoustiques (« <i>acoustic deterrent devices</i> ») : Edren <i>et al.</i>, 2010 ; Graham <i>et al.</i>, 2019 ; Kastelein <i>et al.</i>, 2015 ; Brandt <i>et al.</i>, 2013. - Utilisation d'effaroucheurs acoustiques pendant les travaux de construction (« <i>acoustic porpoise deterrents</i> », « <i>acoustic harassment devices</i> ») : Carstensen <i>et al.</i>, 2006. - Interdiction de démarrer les opérations de construction avant vérification de l'absence de mammifères marins dans un rayon de 1 km autour du site : Bailey <i>et al.</i>, 2010. - Montée en puissance sonore progressive lors des travaux de construction (« <i>ramping</i> » ou « <i>soft start</i> ») : Tougaard <i>et al.</i>, 2009a, 2009b ; Bailey <i>et al.</i>, 2010 ; Graham <i>et al.</i>, 2023. - Mise en place de rideaux de bulles ou de barrières d'isolation acoustique : Brandt <i>et al.</i>, 2018 ; Juretzek <i>et al.</i>, 2021. - Mise en place de rideaux de bulles et de dispositifs d'atténuation sonore : Schaffeld <i>et al.</i>, 2020. - Utilisation de rideaux de bulles : Nehls <i>et al.</i>, 2016. - Combinaison de rideaux de bulles et de dispositifs acoustiques de dissuasion (« <i>acoustic deterrent devices</i> ») : Dahne <i>et al.</i>, 2017 ; Brandt <i>et al.</i>, 2011. - Utilisation de mâts à fondation gravitaire ou flottante en alternative aux fondations installées par battage : Potlock <i>et al.</i>, 2023. - Utilisation de méthodes prédictives des effets du bruit sur le dérangement des phoques, fondées sur des zones annulaires : Whyte <i>et al.</i>, 2020. Poissons : - Adaptation du calendrier des travaux de construction afin de limiter les perturbations sur les poissons : Hammar <i>et al.</i>, 2014. Écosystème : - Utilisation de barrières acier/air isolées ou de rideaux de bulles internes, seuls ou en combinaison, afin d'atténuer les émissions sonores : Sigray <i>et al.</i>, 2022.
Autres introductions d'énergies (champs électromagnétiques)	Macrofaune benthique : - Enfouissement des câbles électriques à une profondeur non atteignable par la macrofaune benthique et suffisante pour atténuer les champs électromagnétiques (environ 1 à 2 m) : Williams <i>et al.</i>, 2023.
Pressions à l'échelle des paysages marins	Écosystème : - Mise en œuvre de démarches de cartographie et de sélection des zones d'implantation des infrastructures : Huang <i>et al.</i>, 2022.

Tableau 3. Mesures d'atténuation testées ou évaluées empiriquement dans la littérature scientifique du corpus, par type de pression et groupe biologique.

4. Incertitudes et lacunes de connaissances

Les résultats présentés doivent être interprétés en tenant compte de plusieurs limites.

Les principales lacunes concernent notamment :

- Le caractère récent de ce champ de recherche, avec une structuration progressive seulement depuis quelques années ;
- Une focalisation sur quelques groupes biologiques (oiseaux et mammifères marins), laissant de côté de nombreuses composantes de la biodiversité marine ;
- Une attention portée quasi exclusivement à certaines pressions (ex. émissions sonores), au détriment d'autres effets ;

- Peu d'attention portée à la partie immergée des éoliennes ;
- Des approches très majoritairement centrées sur les individus et les populations, peu de travaux portant sur les communautés, la diversité génétique, les écosystèmes ou les dynamiques socio-écologiques ;
- Des stratégies documentées qui reposent sur des ajustements techniques (volet Réduire) tandis que les leviers en amont des projets (Éviter) ou aval (Compenser) sont peu explorés ;
- La majorité des mesures recensées ne sont pas testées, ce qui limite fortement la capacité à juger de leur efficacité réelle ;
- Un manque d'études destinées à améliorer l'intégration socio-écologique des parcs éoliens. Une seule étude propose d'aller au-delà de la séquence ERC, en s'inscrivant dans une démarche de conception « *Nature Positive* », à travers la mise en œuvre de mesures d'éco-conception (« *Nature Inclusive Design* ») et d'une renaturation volontaire.

5. Contextualisation à partir de tendances et pistes de recherche émergentes

Pour situer l'analyse, 21 articles complémentaires ont été examinés. Au total, 9 mesures originales, qui complètent les mesures ERC relevées précédemment, ont été retenues sur la base de critères de pertinence (cf. chapitre complet) :

Mesures de gestion :

- « *Strategic Net Gain Assessments* » (SNGA) : pour atténuer les effets négatifs et générer des effets positifs en se basant sur les services écosystémiques (Edwards-Jones *et al.*, 2024).

Mesures de planification :

- « *PlanWise4Blue* » (PW4B) : évaluer les effets cumulés et optimiser la planification spatiale maritime avec une matrice d'aide à la décision (Kotta *et al.*, 2020) ;
- « *Best Practicable Environmental Option* » : plan de réduction de l'effet environnemental des déchets en fin de vie des structures éoliennes, lors de la phase de démantèlement (Hall *et al.*, 2022) ;
- « *Low Spatial Resistance* » : outil d'aide à la décision reposant sur une table d'indicateurs pour le positionnement à moindre effet d'un parc éolien en mer, également appelée approche de « *macro-siting* » (Gartman *et al.*, 2016).

Mesures techniques :

- Aquaculture intégrée : culture de moules ou de macro-algues dans les parcs éoliens pour restaurer les habitats d'oiseaux (zones d'alimentation) et améliorer la qualité de l'eau (Maar *et al.*, 2023) ;
- Modernisation des infrastructures : « *repowering* » (augmentation de la puissance) et « *retro-fitted* » (remplacement de composants obsolètes) permettant notamment de réduire les émissions sonores des éoliennes (Merchant, 2019 ; Farr *et al.*, 2021) ;
- Maintenance adaptée : utilisation de bateaux moins bruyants et mise en place d'une auto-gouvernance des pilotes pour limiter les nuisances sur les cétacés (Chen *et al.*, 2023 ; Merchant, 2019) ;
- Gestion adaptative : ajustement des mesures d'atténuation en fonction du taux réel de collisions d'oiseaux (Farr *et al.*, 2021) ;
- « *Renewables-to-reefs* » : dans certains cas, lors du démantèlement, les parties sous-marines des infrastructures colonisées peuvent être laissées en place après la phase d'exploitation, uniquement « *si l'habitat créé sur les structures présente une valeur de conservation ou une valeur commerciale* » (Smyth *et al.*, 2015).

L'analyse de la littérature grise et des retours d'expérience issus d'autres activités maritimes permettent d'intégrer des pistes de réflexion, axées sur les enjeux socio-écologiques. Ces dernières constituent des orientations émergentes et s'articulent autour de trois directions majeures :

- La synergie des usages (Écologie de la réconciliation et « *Sato-Umi* ») : l'objectif est de créer des co-bénéfices entre la production d'énergie et les activités traditionnelles (pêche gérée, algoculture, etc.). En transformant les parcs en espaces multi-usages, on cherche un équilibre gagnant-gagnant où les infrastructures soutiennent à la fois l'économie locale et les fonctions écologiques ;
- L'éco-conception (« *Nature Inclusive Design* ») et l'ambition « *Nature Positive* » : l'ingénierie évolue vers des approches de « *Nature Inclusive Design* ». Plutôt que de simples structures industrielles, les infrastructures (fondations, mâts, câbles) sont éco-conçues comme des supports actifs pour certaines composantes de la biodiversité, notamment sous la forme d'habitats artificiels (Richards et Moore, 2026). L'ambition est ainsi d'ajouter à la logique de compensation des pertes celle d'un gain net positif (« *Nature Positive* ») pour l'écosystème marin ;
- Intégration des parcs éoliens aux socio-écosystèmes :
 - Complexité d'échelle : l'évaluation des effets doit s'articuler du local (micro) au régional (macro) pour éviter de relativiser les effets entre échelles ou de sous-estimer les effets cumulés ;
 - Risques écologiques : la colonisation biologique peut engendrer des effets non anticipés, tels que l'établissement et la propagation d'espèces non indigènes ou invasives, ou encore la création de « pièges écologiques ». Ces derniers peuvent se traduire, par exemple, par une augmentation de l'abondance de poissons favorisant la prédation sur certaines espèces, ou par des effets délétères sur les populations liées à leur exposition accrue à des polluants ;
 - Restauration mutualisée : pour plus d'efficacité, une tendance se dessine vers la mutualisation des mesures et moyens sur des sites regroupant plusieurs projets de restauration compensatoire ou de renaturation (Sites Naturels de Compensation Restauration et Renaturation).

MESSAGES-CLÉS

- La littérature scientifique sur les mesures d'atténuation est quantitativement importante (100 articles pour 115 études), mais elle met en évidence un écart marqué entre le nombre de mesures proposées non testées (66%) et celles effectivement testées en conditions réelles (34%) ;
- Les mesures discutées relèvent presque exclusivement de l'étape de réduction (85 %), principalement via des approches techniques. Les mesures d'évitement et de compensation, qui reposent davantage sur des leviers de gestion ou de planification, sont marginalement représentées dans la littérature analysée. Cette distribution met en évidence un déséquilibre dans les travaux disponibles, les approches d'évitement — seules à même de prévenir toute perte en amont — demeurant à ce jour peu documentées ;
- La forte concentration géographique des études en Europe du Nord limite la diversité des contextes étudiés : il existe notamment peu de travaux consacrés aux mesures d'atténuation en Chine, alors même que ce pays représente près de 50 % de la capacité mondiale installée.
- Les travaux se concentrent sur certaines pressions — principalement les émissions sonores et les structures en tant qu'obstacle physique au déplacement — ainsi que sur quelques groupes biologiques (mammifères marins et oiseaux), ce qui limite la portée globale des enseignements, notamment pour d'autres compartiments biologiques (poissons, macro-invertébrés, algues, etc.) ;
- Les études portant sur les communautés, la diversité génétique, les écosystèmes et les dynamiques socio-écologiques restent peu développées, malgré leur importance pour comprendre et évaluer les effets réels des projets et des mesures d'atténuation en réponse ;
- Des propositions émergent autour de l'ingénierie écologique (« *Nature Inclusive Design* » / éco-conception, « *Nature Positive* », solutions fondées sur la nature), du développement de co-bénéfices (co-usages) et d'approches intégratives (« *Sato-Umi* », GIZC). Toutefois, ces pistes demeurent à ce stade largement

exploratoires et encore peu étayées dans le contexte spécifique de l'éolien en mer. Les travaux futurs consacrés aux socio-écosystèmes marins devraient contribuer à documenter plus finement leurs conditions de mise en œuvre, leur efficacité et leurs éventuels effets indirects ;

- Les méthodes d'évaluation des pertes et des gains de biodiversité ne sont pas standardisées, ce qui entraîne des difficultés pour mesurer la significativité des pertes et évaluer les performances des mesures relevant de la séquence Éviter – Réduire – Compenser (ERC) ;
- L'application de la séquence Éviter – Réduire – Compenser (ERC) aux échelles micro (éolienne), méso (parc) et macro (éco-région) doit être conduite de manière indépendante, afin de renforcer le principe de non-substitution d'échelle. Dans le cas contraire, l'analyse des effets à l'échelle macro peut conduire à relativiser, voire à rendre non significatifs, les effets observés à l'échelle micro, avec pour conséquence potentielle une réduction du volet compensatoire.

2. Enjeux transverses : évaluer les effets cumulés, réduire les incertitudes, identifier les conditions de transposabilité aux eaux de France hexagonale

Introduction

Les attentes exprimées par les commanditaires dans le cadre de cette expertise scientifique collective portaient sur plusieurs enjeux transversaux liés à l'évaluation des effets des parcs éoliens en mer sur la biodiversité marine. Elles concernaient en particulier le cumul des effets, le niveau d'incertitude associé aux connaissances disponibles, ainsi que la transposabilité des résultats aux écosystèmes marins de France hexagonale.

Les questions posées portaient sur les méthodes mobilisées pour caractériser le cumul d'effets, depuis l'échelle locale de l'éolienne jusqu'à celle de la façade maritime, et sur des horizons temporels couvrant l'ensemble des phases de développement des parcs, y compris les dynamiques de récupération des milieux après la phase de démantèlement. Une attention particulière devait être portée à la manière dont la littérature aborde d'éventuelles interactions, synergies ou antagonismes avec différentes pressions anthropiques, telles que l'exploitation des ressources marines ou le changement climatique, ainsi qu'entre pressions générées par les parcs éoliens et forçages naturels.

Les attentes concernaient également le niveau de certitude des connaissances disponibles, l'identification des effets faisant l'objet de controverses, ainsi que la mise en évidence des principales lacunes de connaissances et des modalités permettant de les combler. La capacité des travaux scientifiques à traduire ces connaissances en éléments mobilisables pour le suivi de l'environnement (recommandations, cadres méthodologiques, indicateurs, etc.) constituait un autre point d'attention. Enfin, la question de la transposabilité des résultats aux écosystèmes marins de France hexagonale était centrale, au regard des caractéristiques des écosystèmes dans lesquelles les études ont été conduites et publiées.

À partir d'une analyse globale de la littérature scientifique rassemblée et des analyses réalisées par type de pression, cette section transversale, qui s'inscrit au-delà du cadre méthodologique de la revue systématique suivi jusqu'à présent, synthétise les enseignements relatifs aux effets cumulés et aux échelles multiples auxquelles ils sont analysés (biologiques, spatiales et temporelles), ainsi qu'aux incertitudes et à la transposabilité des résultats, afin de proposer une lecture intégrée des connaissances disponibles.

Méthode et définitions

Dans l'objectif de répondre aux principales questions transversales formulées par les commanditaires, une démarche d'analyse spécifique a été développée autour de trois thématiques interconnectées : le cumul des effets, les incertitudes associées aux connaissances disponibles et la transposabilité des résultats aux écosystèmes marins hexagonaux.

Cette démarche reposait notamment sur un travail d'élucidation conduit avec l'ensemble du collectif d'expert·es, à partir d'un exercice de cartographie conceptuelle (« *mind mapping* »). Celui-ci visait à construire une compréhension commune et opérationnelle de ces notions, souvent mobilisées de manière hétérogène dans la littérature scientifique. Cet exercice a permis d'identifier les principaux enjeux associés à chacune des thématiques, de structurer les différentes dimensions d'analyse mobilisées dans la littérature, et d'élaborer une grille de lecture commune pour le traitement de ces questions transversales.

L'analyse menée dans cette section ne repose pas sur un codage complémentaire des articles du corpus de la revue systématique de littérature. Elle s'appuie en revanche sur l'identification, au sein des publications analysées, des éléments relatifs au cumul des effets, aux incertitudes et à la transposabilité explicitement abordés dans les résultats, discussions ou conclusions des articles.

En pratique, ce travail a été conduit en deux étapes complémentaires : (i) des compléments d'analyse réalisés au sein de chaque chapitre thématique consacré à une pression ; puis (ii) une mise en commun et un approfondissement transversal de ces analyses à partir des articles les plus pertinents du corpus, des échanges issus de la démarche d'élucidation, ainsi que de travaux de synthèse et de références méthodologiques complémentaires mobilisés dans la littérature scientifique. L'analyse des incertitudes a également intégré les résultats de la cartographie des lacunes de connaissances.

Pour chacune des trois thématiques transversales, le travail a consisté à : (i) définir collectivement les concepts mobilisés ; (ii) analyser les enjeux associés à partir d'une grille de lecture commune appliquée aux publications du corpus ; puis (iii) identifier des pistes méthodologiques et des besoins de connaissances permettant de mieux prendre en compte ces enjeux dans l'évaluation des effets des parcs éoliens en mer sur la biodiversité marine.

Les définitions présentées dans l'encart ci-dessous sont issues de la démarche d'élucidation menée avec le collectif. Elles ont été établies et validées collectivement par les expert·es afin de disposer d'un cadre commun pour le traitement des trois thématiques transversales.

À retenir – Définitions issues de la démarche d'élucidation

Cumul d'effets : Le cumul d'effets correspond à l'évaluation des effets résultant de l'interaction de plusieurs pressions exercées sur une composante écologique, à différentes échelles de temps, d'espace et d'organisation biologique. Les conséquences de ces cumuls peuvent s'additionner (cumul additif), se renforcer mutuellement (synergie), s'atténuer (effet tamponné ou antagoniste) ou déclencher des cascades d'effets (par exemple via des effets indirects au sein du réseau trophique). Le cumul d'effets peut concerner des pressions issues d'activités différentes, ou des pressions différentes associées à une même activité, y compris les pressions associées au changement climatique. Dans le cas du développement de l'éolien en mer, il peut ainsi combiner l'expansion spatiale des parcs, l'augmentation de la taille des turbines, la mise en place de zones de non-prélèvement (no-take zones), ainsi que des activités connexes (maintenance, extension portuaire, etc.).

Incertitude : L'incertitude se définit à partir du niveau de confiance que l'on accorde à une connaissance donnée. Elle repose sur une évaluation des différentes sources d'erreurs et des lacunes de connaissance. L'incertitude est un élément constitutif de l'élaboration de mesures de gestion adaptées, notamment au regard du principe de précaution. Elle conduit également à prioriser des actions de recherche visant à combler les lacunes de connaissance identifiées.

Transposabilité : La transposabilité correspond à la possibilité d'appliquer certains résultats et conclusions, ainsi que des méthodes d'analyse (modèles, relations causes-effets), d'un contexte à un autre (technologique, spatial ou temporel), en prenant en compte les caractéristiques écologiques, technologiques ou liées à d'autres pressions (biogéographie, groupes biologiques, spécificités du parc, compartiments biologiques, configuration).

1. Les cumuls d'effets, ou le défi du changement d'échelles

Analyse des enjeux liés aux cumuls d'effets

Types de cumuls d'effets

Le terme de cumul recouvre des conceptions variées de l'accumulation d'effets. Leur caractérisation peut s'appuyer sur la notion de « chaînes d'impacts » (Knights *et al.*, 2013), qui décrit le lien entre une activité, les pressions qu'elle génère et les réponses des composantes écologiques. Cette approche repose sur l'idée qu'« une activité génère une pression qui impacte une variable écologique » (Figure 29).

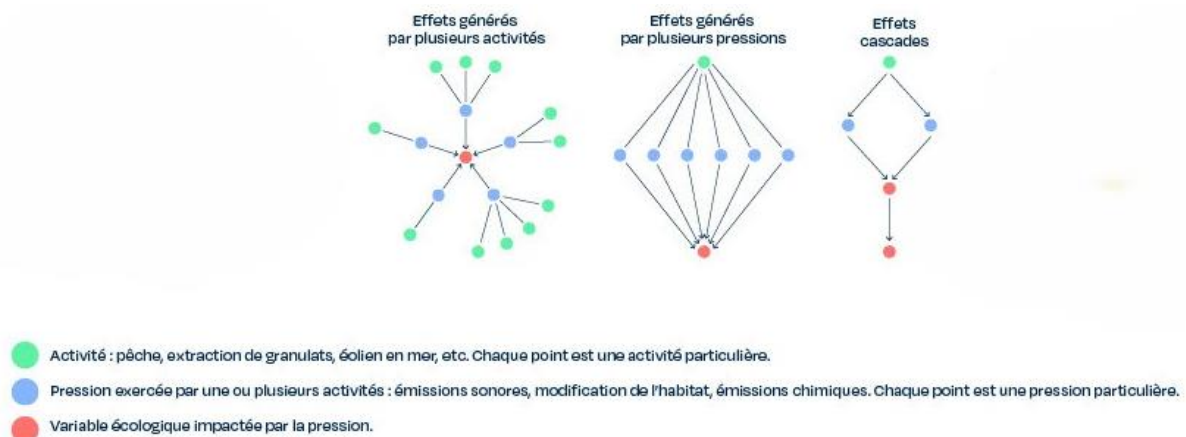


Figure 29. Représentation de différentes « chaînes d'impacts » concernées par l'analyse du cumul. Une chaîne d'impacts simple peut relier une activité à une pression puis à une variable écologique, par exemple : éolien en mer → émissions sonores → audition des phoques gris. Elle peut également illustrer un effet en cascade, lorsqu'une modification d'une variable écologique entraîne à son tour des effets sur une autre variable, par exemple : éolien en mer → émissions sonores → audition des phoques gris → changement d'aire de distribution. Les chaînes d'impacts analysées dans le cadre du cumul peuvent concerner plusieurs activités (en vert ; par exemple : parc éolien en mer, pêche, extraction de granulats) ou une même activité associée à plusieurs pressions (en bleu ; par exemple : émissions sonores, modification des habitats, émissions chimiques). Elles peuvent également concerner plusieurs variables biologiques d'intérêt (en rouge). Figure modifiée d'après Knights et al. (2013).

Plusieurs catégories de cumul d'effets peuvent être distinguées :

- Le cumul entre pressions liées à différentes activités anthropiques : par exemple, les effets du développement de l'éolien en mer peuvent se cumuler avec ceux de l'extraction de granulats ;
- Le cumul entre pressions liées à une même activité : par exemple, les émissions sonores et les modifications d'habitat associées à l'éolien en mer ;
- Le cumul entre échelles spatiales : par exemple, les effets des émissions sonores générées par plusieurs parcs éoliens ;
- Le cumul entre échelles temporelles : par exemple, les effets des émissions sonores au cours des différentes phases de développement des parcs ;
- Le cumul peut également agir en cascade au sein d'un réseau d'interactions écologiques (ex. l'influence d'une variation d'abondance d'une population sur ses proies), entre niveaux d'organisation biologique (ex. les conséquences à l'échelle d'une population de la mortalité d'individus par collision), ou encore sur les trajectoires temporelles des écosystèmes et des espèces qu'ils abritent (ex. une diminution des capacités adaptatives des populations face aux changements environnementaux).

Méthodes d'évaluation des interactions entre pressions liées au développement de l'éolien en mer

Les effets des parcs éoliens en mer résultent du cumul de plusieurs pressions, souvent difficiles à distinguer. Les approches classiques, fréquemment fondées sur la superposition spatiale des activités et sur des matrices de sensibilité, permettent d'identifier des zones à risque, mais reposent souvent sur l'hypothèse simplificatrice d'un cumul additif.

Les principales méthodes d'analyse du cumul d'effets reposent sur la modélisation numérique. Le passage de l'échelle individuelle à celle des populations peut, par exemple, s'appuyer sur le modèle DEPONS, utilisé pour simuler les déplacements de marsouins communs (*Phocoena phocoena*) en réponse aux perturbations sonores (Nabe-Nielsen et al., 2018). Ce modèle permet de relier une perte d'énergie à l'échelle individuelle à une diminution de la capacité de reproduction, puis d'en déduire des conséquences potentielles à l'échelle des populations. Les résultats issus de ces simulations peuvent ensuite être mobilisés dans le cadre de la planification

spatiale maritime, notamment pour le phasage des parcs à construire en mer du Nord, afin de limiter les effets sur cette espèce.

D'autres approches reposent sur l'expertise scientifique et la hiérarchisation des interactions entre activités, pressions et récepteurs biologiques. Brignon *et al.* (2022) estiment ainsi le cumul à partir d'une élicitation d'expert·es visant à prioriser les chaînes d'effet entre activités, pressions et récepteurs biologiques. Leur approche repose sur des critères de notation prenant en compte l'importance écologique des récepteurs, le niveau de connaissance disponible ainsi que la sensibilité de chaque récepteur aux différentes pressions.

Plus récemment, des travaux proposent des approches davantage intégrées, mobilisant des modèles trophiques spatialisés afin de représenter les interactions entre pressions, espèces et écosystèmes (Noguès *et al.*, 2023), ou un cadre combinant modèles écosystémiques, interactions biophysiques et quantification des services écosystémiques (Trifonova *et al.*, 2025).

Différents groupes biologiques étudiés

La recherche sur le cumul d'effets s'est principalement concentrée sur les oiseaux, les mammifères marins et certains poissons, même si un intérêt plus récent apparaît pour des groupes écologiquement clés, tels que le phytoplancton (Daewell *et al.*, 2022).

Pour les poissons, plusieurs études indiquent que les effets cumulés dépendent du stade de vie. Une analyse fondée sur des dires d'expert·es souligne que l'adaptation du calendrier des travaux lors de la phase de construction des parcs peut réduire efficacement les risques, en évitant certaines périodes de grande sensibilité (Hammar *et al.*, 2014).

Chez les oiseaux, les effets de collision et d'évitement peuvent se cumuler et devenir préoccupants à l'échelle de certaines populations exposées à plusieurs parcs, en particulier pour les espèces à faible taux de reproduction (Masden *et al.*, 2010). Les connaissances restent toutefois limitées, notamment en raison du manque d'analyses intégrées à grande échelle. Des constats similaires s'appliquent également aux chauves-souris, pour lesquelles les données disponibles demeurent encore restreintes.

Chez les mammifères marins, les preuves directes concernant les interactions entre pressions restent très limitées, en raison du manque d'études croisant explicitement plusieurs pressions (Hague *et al.*, 2022).

Changements d'échelles biologiques, spatiales et temporelles

De nombreux travaux soulignent l'intérêt d'approches intégrées pour évaluer les effets cumulés entre différents niveaux d'organisation biologique, ainsi que les effets en cascade, notamment au sein des réseaux trophiques. Concernant le fonctionnement des écosystèmes, la prise en compte des cumuls — entre parcs éoliens, entre phases de développement et entre activités — apparaît primordiale, mais peu de méthodes sont à ce jour disponibles pour les appréhender efficacement. À ce titre, certaines approches exploratoires visent à simuler conjointement plusieurs types de pressions afin d'en analyser les interactions. Par exemple, Noguès *et al.* (2023) comparent des scénarios simulés conjointement ou séparément, en examinant l'effet récif associé aux structures éoliennes et les effets du changement climatique sur la répartition de différentes espèces, au sein d'un modèle de réseau trophique spatialisé, couplé au calcul d'indices de fonctionnement des écosystèmes (recyclage, omnivorie).

L'échelle d'étude qui englobe, par sa grande taille, l'ensemble des cumuls d'effets dans l'espace est celle du paysage marin (ensemble d'écosystèmes considérés à l'échelle régionale et suprarégionale). Plusieurs études proposent des méthodes visant à mieux évaluer ces effets cumulés, telles que la quantification de la perte d'habitat ou l'analyse de la connectivité (écologique, génétique ou fonctionnelle) dans certaines zones. La localisation des parcs éoliens apparaît comme un enjeu central dans ce cadre, même si Goodale et Milman (2020) concluent que les fous de Bassan (*Morus bassana*) peuvent subir des effets cumulés quel que soit l'emplacement considéré. La connectivité entre zones marines est également susceptible d'amplifier les effets cumulés, comme cela a été montré pour la moule commune (*Mytilus edulis*) par Jonsson *et al.* (2021). Ces travaux mettent ainsi en évidence l'importance d'intégrer la connectivité dans les approches d'évaluation des effets cumulés.

Pistes pour mieux estimer le cumul d'effets

De nombreuses publications soulignent les limites actuelles de la prise en compte des cumuls d'effets, et proposent plusieurs pistes pour améliorer leur estimation :

- Renforcer les cadres théoriques en écologie : Isaksson *et al.* (2023) soulignent l'intérêt d'orienter les recherches vers un développement des théories écologiques (principes généraux expliquant les processus qui déterminent la dynamique des écosystèmes), afin d'ancrer davantage les études sur des hypothèses qui en découlent ;
- Mieux intégrer les effets cumulés non additifs dans les évaluations : de nombreuses publications mettent en avant la nécessité de développer des approches plus intégrées, capables de prendre en compte les interactions entre activités, les effets à différentes échelles spatiales, ainsi que les dynamiques temporelles du court au long terme (par ex. Brabant *et al.*, 2015 ; Hague *et al.*, 2022) ;
- Faire évoluer les indicateurs d'évaluation : Durning et Broderick (2019) ainsi que Critchley *et al.* (2025) insistent sur l'importance de développer des indicateurs plus pertinents écologiquement, d'intégrer les réponses comportementales et fonctionnelles des espèces, ainsi que d'adopter des cadres méthodologiques plus dynamiques et adaptatifs ;
- Développer des approches globales et de long terme : Busch *et al.* (2013) évoquent l'intérêt d'approches transnationales, par exemple en considérant la mer du Nord comme une unité de gestion commune. Plusieurs publications soulignent également l'importance de mener des études prospectives à long terme, tenant compte de l'accumulation progressive des projets éoliens, des effets différés et des interactions avec le changement climatique (ex. Cook *et al.*, 2021 ; Critchley *et al.*, 2025) ;
- Prendre en compte les enjeux de gouvernance : Busch *et al.* (2013) mettent en évidence les limites des évaluations conduites « projet par projet » et l'intérêt d'une harmonisation des méthodes de suivi et d'évaluation entre pays. Plusieurs références soulignent également le rôle de l'expertise scientifique dans les processus décisionnels, notamment pour la planification stratégique et la co-construction de prospectives entre chercheur·ses, gestionnaires et décideur·ses (par ex. Durning et Broderick, 2019 ; Cervantes *et al.*, 2025 ; Brignon *et al.*, 2022).

2. Incertitudes multiples conditionnant la transposabilité des résultats

Facteurs d'incertitude

Plusieurs catégories d'incertitudes sont définies dans la littérature (Regan *et al.*, 2002 ; Kujala *et al.*, 2013). Dans le cadre de l'expertise, l'analyse s'est concentrée sur les incertitudes épistémiques, qui résultent d'un manque de connaissances relatif à la compréhension des processus naturels et anthropiques ou aux sources de leur variabilité.

Variabilité naturelle

Pour de nombreuses grandeurs mesurables en milieu marin, la variabilité saisonnière et l'hétérogénéité spatiale présentent souvent une amplitude supérieure à la variabilité interannuelle, ce qui augmente le nombre d'observations nécessaires pour établir des relations statistiquement robustes. La capacité à détecter des effets dépend également de la pertinence et de la puissance des tests statistiques mobilisés (Baguley, 2004), de la prise en compte de facteurs confondants, ainsi que de la définition d'une situation de référence sur laquelle reposent les hypothèses que l'on souhaite tester.

Phases de développement des éoliennes en mer

L'analyse des effets associés aux différentes phases de développement des éoliennes en mer demeure très inégale. Un exemple important concerne le démantèlement, pour lequel des travaux de synthèse récents ont proposé un bilan des connaissances en s'appuyant sur l'ensemble des structures artificielles en mer comme analogues (Lemasson *et al.*, 2023 ; 2024). Les lacunes actuelles conduisent à distinguer, d'une part, les preuves directes issues

d'études de cas portant sur des structures effectivement démantelées, et, d'autre part, les preuves indirectes relatives à la présence de ces structures avant leur démantèlement. Ces dernières ne décrivent pas les effets du démantèlement au sens strict, mais plutôt ceux associés à la présence des infrastructures en mer. Les preuves indirectes, fondées sur des analogues, peuvent néanmoins contribuer à éclairer les effets environnementaux potentiels de certaines options de démantèlement.

Types de sites, types d'éoliennes et couverture géographique

Les effets associés aux technologies d'éoliennes flottantes restent peu documentés. Bray *et al.* (2016) ont montré que les effets biologiques observés pour les parcs éoliens en mer en Europe du Nord ne sont pas directement transposables aux éoliennes flottantes dans le contexte méditerranéen. Plus globalement, la couverture géographique des études demeure fortement centrée sur l'Atlantique Nord-Est, qui regroupe 260 articles sur les 411 du corpus issu de la revue systématique. Cette concentration limite la généralisation des résultats à d'autres régions du monde, y compris celles présentant des habitats marins comparables. Les recherches menées en France hexagonale représentent un sous-ensemble, et aucun article du corpus ne concerne les côtes méditerranéennes. L'orientation méthodologique de ces travaux se traduit par un recours plus important à la modélisation (56,7 %) qu'aux études *in situ* (30 %).

Échelles de temps et d'espace

Les effets à long terme restent largement méconnus, la durée moyenne des études analysées demeurant très inférieure à la durée de vie des parcs (Coates *et al.*, 2015). Sur le plan spatial, les effets à l'échelle du paysage marin, incluant la connectivité entre parcs et habitats artificiels, ne sont pas abordés dans les publications du corpus, ce qui limite la capacité à appréhender les effets cumulés au-delà de l'échelle des parcs et sur le long terme.

Groupes biologiques et processus

Des lacunes et des biais persistent concernant les types de pressions étudiées, les groupes biologiques considérés, les variables essentielles de biodiversité (EBV), ainsi que les processus d'effet analysés. Ces limites affectent la transposabilité des résultats et conduisent souvent à des recommandations de recherche de portée générale. Vaher *et al.* (2022) soulignent par exemple les lacunes de connaissances relatives à la sensibilité des habitats benthiques face à différentes pressions, rendant incertaine l'analyse du « risque d'impact ». Ces lacunes génèrent des incertitudes importantes quant à la capacité à observer, évaluer et prédire les effets des parcs éoliens en mer sur le compartiment benthique, et, plus largement, quant au maintien des fonctions biologiques et écosystémiques associées, avec des implications potentielles pour la viabilité des socio-écosystèmes.

Approches expérimentales

Dans certains cas, les approches expérimentales sont privilégiées par rapport aux mesures de réponse *in situ*. Elles présentent l'avantage de faciliter la mise en place de plans expérimentaux et le test d'hypothèses, notamment grâce au contrôle des facteurs étudiés. Ces approches sont ainsi mobilisées pour analyser certaines relations entre pressions et groupes biologiques, mais la question de la transposabilité des résultats aux conditions naturelles demeure un enjeu important.

Formalisation et modélisation des liens de causalité

La formalisation des liens de causalité entre facteurs de stress et récepteurs biologiques facilite la hiérarchisation des processus, la prise en compte de voies d'effet combinées et la communication des résultats. Hammar *et al.* (2014) montrent ainsi comment des données issues de sources différentes peuvent être associées afin d'évaluer la probabilité d'un effet au moyen de schémas de causalité. D'autres cadres méthodologiques existent, tels que la modélisation écosystémique (Isaksson *et al.*, 2023), l'évaluation des effets cumulés ou encore l'analyse des risques environnementaux (MacLean *et al.*, 2014 ; Hammar *et al.*, 2014 ; Kotta *et al.*, 2020 ; May *et al.*, 2020). L'évaluation de l'incertitude est intégrée dans plusieurs de ces approches, mais demeure un aspect à renforcer dans les applications actuelles (Stelzenmuller *et al.*, 2015).

Conséquences des incertitudes

Lemasson *et al.* (2023) soulignent que les données probantes mobilisées pour éclairer la prise de décision sont souvent incomplètes, contextuelles et difficilement transposables. Ces lacunes impliquent de reconnaître et de communiquer clairement les limites des connaissances disponibles, tout en rappelant que l'expertise scientifique ne constitue qu'un élément parmi d'autres du processus décisionnel. Une attention particulière doit également être portée au risque de « *shifting baseline* » (en référence à Pauly, 1995), dans la mesure où l'artificialisation croissante des zones côtières peut modifier la perception des changements environnementaux et la définition de normes de référence relatives à l'état des écosystèmes à transmettre aux générations futures (Lemasson *et al.*, 2024).

Certains travaux proposent des approches visant à éclairer la prise de décision lorsque les connaissances scientifiques ne permettent pas de lever l'ensemble des incertitudes. Ainsi, Lemasson *et al.* (2024) reprennent les recommandations issues d'une approche multicritère développée par Nicolette *et al.* (2023) dans le cadre du démantèlement des structures artificielles en mer. Cette approche, développée pour éclairer la décision publique, repose sur des principes de transparence, de quantification et de reproductibilité fondés sur les connaissances scientifiques, afin d'examiner les différentes options au regard de leurs bénéfices écologiques et sociétaux à long terme, dans une logique conforme au cadre réglementaire du principe de précaution. Par ailleurs, plusieurs évaluations des risques environnementaux intégrant explicitement les incertitudes conduisent d'autres auteur·ices à recommander d'adapter, de limiter, voire d'exclure l'implantation de parcs dans certaines zones selon les caractéristiques biophysiques, écologiques et technologiques propres à chaque contexte (Gilles *et al.*, 2009 ; Lloret *et al.*, 2022 ; Lloret *et al.*, 2023 ; Danovaro *et al.*, 2024).

Pistes pour réduire les différentes formes d'incertitude

La littérature met en évidence plusieurs leviers permettant de réduire les différentes formes d'incertitude, afin d'améliorer la transposabilité et la fiabilité des résultats :

- Limiter les incertitudes d'origine linguistique et décisionnelle : Masden *et al.* (2015) proposent d'adopter un vocabulaire normalisé afin d'harmoniser les attentes des acteurs impliqués dans les évaluations dès les premières étapes des projets. Ils soulignent également l'importance de formuler les conclusions en recherchant un équilibre entre la simplification nécessaire et la complexité des systèmes étudiés, ainsi qu'entre incertitudes et fiabilité des résultats. Enfin, Leung *et al.* (2015) mentionnent l'intérêt de développer des cadres conceptuels formalisant la prise en compte de l'incertitude, ainsi que des guides de bonnes pratiques pour la communication des incertitudes dans les processus de prise de décision ;
- Recourir à des méthodes statistiques standardisées : Methratta (2020, 2021) évalue et compare plusieurs méthodes d'échantillonnage standardisées, et souligne l'importance de prendre en compte les différentes échelles spatiales et temporelles des facteurs d'effet, avec un potentiel de transposition à d'autres relations entre pressions et groupes biologiques ;
- Mobiliser les connaissances expertes : sur la base de dires d'expert·es, Watson *et al.* (2025) établissent un score d'effet sur les services écosystémiques, assorti d'un niveau de confiance, dans un contexte où les preuves sont incomplètes, contradictoires ou manquantes ;
- Recourir à des analogues : l'élargissement des connaissances à des contextes comparables à celui des éoliennes en mer peut faciliter la conduite de méta-analyses et améliorer la transposition des preuves d'effet (Lemasson *et al.*, 2023). L'utilisation d'analogues s'inscrit également, plus largement, dans la recherche de liens de causalité entre pressions et récepteurs biologiques. Elle constitue ainsi l'un des critères mobilisables pour sélectionner et structurer les connaissances existantes dans l'établissement de relations causales (Lowell *et al.*, 2000).

MESSAGES-CLÉS

- Le cumul d'effets est appréhendé comme un phénomène multidimensionnel, intégrant les interactions entre pressions issues de différentes activités, ainsi qu'entre pressions associées à l'éolien en mer, et leurs manifestations à différentes échelles biologiques, spatiales et temporelles. Les effets peuvent être additifs, synergiques, antagonistes ou en cascade. Les travaux examinés mettent en évidence les limites des approches classiques fondées sur l'additivité et soulignent l'intérêt de méthodes plus intégrées, reposant sur des données adaptées aux grandes échelles :
 - Biologiques (notamment à l'échelle du paysage marin) ;
 - Spatiales (interactions entre parcs, y compris au-delà des frontières nationales) ;
 - Temporelles (effets à long terme sur l'ensemble des phases de développement).
- L'analyse des incertitudes souligne leur influence sur la robustesse des connaissances mobilisables dans les processus de décision. La littérature identifie plusieurs leviers pour mieux caractériser et réduire les incertitudes et améliorer la transposabilité des résultats, notamment :
 - La standardisation des protocoles de collecte et d'analyse ;
 - Le développement de modèles prédictifs plus robustes ;
 - La formalisation des incertitudes dans des méthodes d'évaluation ;
 - L'élargissement du socle de connaissances à des travaux portant sur des analogues ;
 - L'élargissement des études à des groupes biologiques encore peu documentés.
- De nombreuses études soulignent les limites actuelles des connaissances, en particulier sur les effets indirects des pressions anthropiques. L'importance de disposer, à l'échelle internationale, de jeux de données harmonisés, partagés et comparables est fréquemment mise en avant pour renforcer la robustesse des analyses à grande échelle et la transposabilité des résultats. La collaboration internationale apparaît à ce titre comme un élément clé pour mutualiser les données et harmoniser les protocoles et méthodes de suivi, en particulier dans les zones transfrontalières ;
- Dans ce cadre, plusieurs travaux mentionnent l'intérêt de démarches de gestion des données de type FAIR (données trouvables, accessibles, interopérables et réutilisables), afin de faciliter la mutualisation des informations et de renforcer la collaboration scientifique. Une première étape consisterait ainsi à rendre FAIR les données issues des suivis environnementaux réglementaires, afin d'en améliorer l'accessibilité pour la communauté scientifique. Les auteurs mettent également en avant la nécessité de faciliter l'accès des équipes de recherche aux sites des parcs éoliens en mer ;
- Des méthodes multicritères intégrant l'expertise scientifique se développent afin de mieux prendre en compte les incertitudes dans l'évaluation des risques écologiques et d'éclairer la sélection des zones propices au développement de l'éolien en mer (Brignon *et al.*, 2022). Par ailleurs, plusieurs auteurs soulignent l'intérêt d'approches de gestion adaptative fondées sur les résultats du suivi environnemental, permettant d'ajuster les mesures d'atténuation au fil du temps en fonction des effets observés (Carpenter *et al.*, 2021 ; Degraer *et al.*, 2021).

BILAN DE L'ESCo

Conformément à la lettre de saisine, cette expertise scientifique collective a établi, à partir de la littérature scientifique internationale, un état de l'art des connaissances disponibles sur les effets des parcs éoliens en mer et de leurs raccordements sur la biodiversité marine et les socio-écosystèmes marins et côtiers. Elle synthétise les acquis de la recherche, tout en mettant en évidence les incertitudes, controverses et lacunes de connaissances persistantes, notamment à long terme et à grande échelle.

Compte tenu du recul encore limité sur les projets implantés au large des côtes françaises, l'expertise a intégré les connaissances acquises dans d'autres contextes et discute les éléments transposables aux eaux hexagonales, ainsi que les principales conditions et limites associées à leur transposition. Elle souligne également que la diversité des choix industriels et des modalités de gestion constitue un facteur déterminant dans l'évaluation des effets des éoliennes en mer sur les socio-écosystèmes marins.

État des connaissances : principaux effets documentés

Les connaissances disponibles mettent en évidence des effets contrastés selon les pressions considérées, les groupes biologiques et les niveaux d'organisation étudiés. Les principaux acquis scientifiques sont les suivants :

- Substrats durs artificiels et effet récif : les fondations jouent un rôle de substrats durs artificiels, favorisant une colonisation rapide et des modifications locales des communautés, avec des effets fonctionnels sur les réseaux trophiques. La question demeure de savoir si ces structures conduisent à une augmentation réelle de la production biologique ou relèvent principalement d'un effet d'attraction des individus (controverse « attraction » versus « production »). Dans plusieurs cas, la meilleure condition physique (ex. taille supérieure) observée chez certains organismes tend à étayer l'hypothèse de « production » ;
- Modification des habitats benthiques (fond marin) : des modifications locales des habitats benthiques sont induites par les fondations et protections contre l'affouillement, entraînant des changements de composition et parfois une augmentation locale de la diversité ou de la biomasse à proximité immédiate des structures ;
- Modification des habitats pélagiques (colonne d'eau) : des effets potentiels sur les habitats pélagiques sont associés à des modifications de paramètres physiques de la colonne d'eau (turbulence, stratification, éclaircissement), mais les résultats disponibles restent hétérogènes ;
- Obstacles physiques et faune volante : les structures d'éoliennes constituent un obstacle permanent au déplacement de certaines espèces mobiles, en particulier de la faune volante. Les effets les mieux documentés correspondent à des comportements d'évitement et de modification des trajectoires (effet barrière), principalement observés chez les oiseaux marins et migrateurs, ainsi qu'à un risque de collision avec les pales pour certaines espèces. Les connaissances restent en revanche très limitées concernant les chiroptères, ainsi que les insectes dont ils se nourrissent ;
- Émissions chimiques : les études disponibles, encore très peu nombreuses, indiquent des bioaccumulations possibles de certains métaux sans toxicité aiguë démontrée, avec des effets principalement non létaux, affectant certaines fonctions biologiques et restant localisés ;
- Émissions sonores lors de la phase de construction : le bruit sous-marin, en particulier lors de la construction, constitue l'une des pressions les mieux documentées, avec des réponses comportementales et physiologiques récurrentes observées chez les mammifères marins et les poissons. Les études se concentrent principalement sur les mammifères marins, en particulier le marsouin commun (*Phocoena phocoena*), espèce pourtant peu représentative en raison des fréquences sonores qu'elle utilise. D'autres groupes biologiques, tels que les mollusques et les crustacés, restent en revanche peu étudiés ;
- Champs électromagnétiques et lumière artificielle : les effets des champs électromagnétiques sont le plus souvent non significatifs, ou observés à l'échelle individuelle et locale, sans qu'une possible transposition à l'échelle des populations ait été démontrée. Les effets de la lumière artificielle concernent principalement l'attraction nocturne chez certaines espèces d'oiseaux, mais reposent encore sur un

nombre limité de publications. Aucune donnée n'est disponible dans le corpus concernant cette pression pour les chiroptères ;

- Conséquences de l'introduction d'espèces non indigènes : l'installation locale d'espèces non indigènes sur les substrats artificiels peut affecter la composition des communautés, sans que le sens ni l'ampleur des effets écosystémiques ne soient clairement établis, par manque de connaissances ;
- Restriction des activités de pêche et effet réserve : un effet réserve potentiel est mis en évidence lorsque certaines pratiques de pêche, en particulier le chalutage de fond, sont réduites ou interdites, avec des signaux robustes concernant le macro-benthos fixé, et des réponses moins nettes pour les espèces mobiles ;
- Effets à l'échelle du paysage marin : des propriétés émergentes liées à l'accumulation spatiale des parcs sont observées, avec des changements de distribution et de connectivité, principalement documentés en Europe du Nord. Les changements d'abondance et d'aires de répartition sont les effets les plus fréquemment documentés. Par ailleurs, des cumuls d'effets sont également mis en évidence. Peu d'études quantifient précisément la distance à laquelle les effets sont observables ; néanmoins, les travaux disponibles indiquent qu'ils peuvent être détectés jusqu'à plusieurs dizaines de kilomètres.

Incertitudes et principales lacunes de connaissances

Malgré l'augmentation du nombre d'études, plusieurs lacunes persistent, notamment :

- Pressions sous-documentées : certaines pressions demeurent sous-représentées, en particulier les émissions chimiques, la lumière artificielle, la modification des habitats pélagiques et les conséquences de l'introduction d'espèces non indigènes, ainsi que certains processus à l'échelle du paysage marin, tels que la connectivité ;
- Biais marqués dans les groupes biologiques étudiés : une forte concentration des travaux concerne les mammifères marins, les oiseaux et certaines espèces commerciales de poissons, au détriment d'autres groupes (invertébrés, algues, plancton et autres micro-organismes, espèces pélagiques), ce qui conduit à une représentation déséquilibrée des récepteurs biologiques étudiés et des fonctions écologiques associées ;
- Faible couverture des variables essentielles de la biodiversité (EBV) intégratrices : les efforts de recherche se concentrent principalement sur les groupes biologiques et les niveaux écologiques les plus directement accessibles à l'observation. La couverture des EBV aux échelles des écosystèmes et du paysage marin demeure limitée, ce qui restreint la compréhension des effets de l'éolien en mer sur le fonctionnement global des socio-écosystèmes marins. En outre, la projection des effets à long terme est fortement contrainte par l'absence d'EBV renseignant les processus évolutifs (par exemple la diversité génétique), indispensables pour appréhender les dynamiques adaptatives et la résilience des populations ;
- Manque de données à long terme : le faible recul temporel ne permet pas de distinguer clairement les effets des parcs éoliens de ceux d'autres activités anthropiques, ni de différencier les effets durables de la variabilité naturelle. Il limite également l'évaluation des effets cumulés sur l'ensemble du cycle de développement des parcs, en particulier lors de la phase de démantèlement ;
- Manque d'études multi-pressions : les travaux intégrant simultanément plusieurs pressions, qu'elles soient issues d'une même activité ou de différentes activités anthropiques, y compris dans un contexte de changement climatique, demeurent insuffisants. Cette lacune limite la caractérisation du cumul d'effets, qui peut reposer sur des combinaisons non additives entre pressions (par exemple des synergies) ;
- Transposabilité limitée des résultats à certains contextes : la majeure partie des études disponibles est centrée sur l'Atlantique Nord-Est et ne couvre qu'une fraction de la diversité des écosystèmes marins. Elles portent principalement sur des habitats meubles (principalement sableux) et sur des éoliennes posées, souvent de type monopieu. La prise en compte des différentes échelles spatiales — propres à chaque pression, aux groupes biologiques et à leurs interactions, à la diversité des habitats marins ainsi

qu'aux autres pressions anthropiques — demeure par ailleurs insuffisante. Ces éléments limitent la transposabilité des résultats à d'autres contextes, notamment aux habitats rocheux et aux technologies d'éolien flottant, et appellent une vigilance particulière pour les futurs projets envisagés en Méditerranée ;

- Variabilité des méthodes utilisées : les méthodes statistiques et les protocoles de mesure des effets varient fortement selon les pressions considérées et les groupes biologiques étudiés. Ils n'intègrent pas toujours une évaluation robuste de la significativité ou de l'ampleur des effets, et leur hétérogénéité limite parfois la reproductibilité et la comparabilité des résultats ;
- Démantèlement, une lacune majeure imminente : les effets et les protocoles associés au démantèlement restent très insuffisamment documentés, alors que de nombreux parcs éoliens en mer devraient arriver en fin de vie au cours de la prochaine décennie. Une discussion scientifique existe sur le maintien partiel des structures, pour des raisons économiques et environnementales (« *renewable energy to reef* »), qui interroge à la fois les bénéfices potentiels liés à l'effet récif et la prise en compte de la situation de référence pré-installation.

Verrous scientifiques

L'analyse montre que l'évaluation des effets des parcs éoliens en mer implique de prendre en compte la complexité des interactions, en particulier biophysiques, ainsi que la diversité des échelles spatiales et temporelles concernées, dans un contexte marqué à la fois par l'accroissement des pressions d'origine anthropique, les impératifs de préservation de la biodiversité marine et l'articulation avec des enjeux socio-économiques.

Un verrou scientifique majeur réside dans la difficulté à appréhender le cumul d'effets comme un phénomène multidimensionnel, intégrant les interactions entre pressions issues de différentes activités anthropiques, ainsi qu'entre pressions associées à l'éolien en mer. Mieux comprendre ce cumul suppose, dans un premier temps, de dépasser la simple observation de corrélations entre pressions et variables essentielles de biodiversité (EBV), afin d'identifier les processus sous-jacents et de caractériser les relations de causalité. Ce passage de la corrélation à la causalité constitue également un enjeu central pour la réduction des incertitudes.

Ces verrous sont directement liés à l'insuffisance de données adaptées aux grandes échelles biologiques, spatiales et temporelles, ainsi qu'au manque de recul sur l'ensemble des phases de développement des parcs. L'analyse souligne enfin le rôle majeur des incertitudes, qui influencent la robustesse des connaissances mobilisables dans les processus d'évaluation et de décision publique.

Onze leviers méthodologiques et perspectives pour renforcer l'évaluation et l'atténuation des effets

L'analyse de la littérature scientifique internationale met en avant plusieurs leviers pour renforcer la robustesse des évaluations et améliorer la transposabilité des résultats :

- Approches intégrées et multi-échelles : le développement d'approches intégrées, multidisciplinaires, standardisées et multi-échelles est essentiel pour accompagner le déploiement de l'éolien en mer ;
- Harmonisation des protocoles et méthodes : la standardisation des protocoles de collecte et d'analyse constitue un levier central, en complément du développement de modèles prédictifs plus robustes ;
- Élargissement des groupes biologiques étudiés : l'extension des recherches à des compartiments encore peu documentés est identifiée comme nécessaire, en particulier vers la base des réseaux trophiques ;
- Mobilisation des connaissances expertes : elle permet de réduire et de mieux caractériser les incertitudes lorsque les mesures d'effets sont incomplètes, contradictoires ou manquantes, en complément des connaissances disponibles et dans l'attente de données plus consolidées ;

- Mobilisation d'analogues : l'élargissement du socle de connaissances à partir de pressions ou de contextes comparables facilite la conduite de méta-analyses et renforce la transposabilité des preuves d'effet ;
- Mutualisation et gestion FAIR des données : un progrès important dans l'évaluation des effets est attendu grâce à une meilleure structuration et mise en commun des données, notamment via des démarches FAIR (données faciles à trouver, accessibles, interopérables et réutilisables) ;
- Accès aux données des opérateurs et aux parcs pour la recherche : l'amélioration de l'accessibilité des données issues des suivis environnementaux conduits par les opérateurs de l'éolien, en articulation avec les programmes de recherche, ainsi qu'une simplification des procédures d'autorisation d'accès aux parcs pour les équipes scientifiques, constitue également un levier majeur pour renforcer les connaissances disponibles ;
- Validation *in situ* des mesures d'atténuation dans des conditions réelles : la littérature met en évidence un écart important entre le nombre élevé de mesures d'atténuation proposées et le faible nombre de mesures effectivement testées en conditions réelles, notamment sur le long terme. Cette absence de preuves disponibles, combinée à la concentration des travaux sur quelques pressions (émissions sonores, effet obstacle), restreint la portée opérationnelle des enseignements actuels ;
- Mesures d'atténuation des effets environnementaux : un fort potentiel de recherche subsiste concernant les mesures d'évitement et de compensation, notamment sur la définition des seuils de significativité et sur les méthodes d'évaluation des pertes et des gains écologiques. S'agissant des mesures de réduction, l'intégration sous-marine des matériaux et des infrastructures par l'éco-conception (« *Nature Inclusive Design* ») constitue un champ d'expérimentation international d'intérêt croissant ;
- Approches socio-écologiques hybrides : plusieurs travaux identifient les enjeux d'acceptabilité, notamment liés aux co-usages, comme un levier important pour le développement futur des parcs. Ces approches reposent sur la recherche de co-bénéfices entre acteurs humains (par exemple pêche, tourisme industriel) et non humains (par exemple effet récif). Dans cette perspective, des outils de planification et de gestion intégrée — tels que la planification spatiale maritime (PSM), la gestion intégrée des zones côtières (GIZC) ou les approches par services écosystémiques — pourraient être davantage explorés, y compris à travers des cadres hybrides comme le « *Sato-Umi* » ;
- Gestion adaptative et ajustement des mesures : plusieurs travaux soulignent l'intérêt d'approches de gestion adaptative fondées sur les résultats du suivi environnemental, permettant d'ajuster les mesures d'atténuation au fil du temps dans un contexte de fortes incertitudes.

Le développement des connaissances repose sur l'amélioration des protocoles de suivi à long terme et multi-projets, à l'échelle internationale. Le renforcement des cadres théoriques permettra également de développer des outils numériques d'appui à la décision, nécessaires à la compréhension des effets et à la simulation, dans une démarche éclairée par la connaissance.

À terme, un aboutissement pourrait être le développement d'une modélisation intégrée de type jumeau numérique des écosystèmes marins, sur le modèle des outils utilisés en météorologie. Cet objectif demeure toutefois très lointain à ce jour, car il repose sur la compréhension de phénomènes d'une grande complexité, dont les processus de causalité restent encore très imparfaitement décrits. Néanmoins, le fait de disposer de cette trajectoire à long terme peut contribuer à orienter l'évolution des dispositifs de suivi et de collecte de données, afin de progresser vers cet objectif.

Zoom – Une convergence des constats avec les travaux récents conduits par BIOTOPE et EKLIPSE

Les conclusions de l'ESCo convergent avec celles de l'étude menée par BIOTOPE (2025) dans le cadre du projet RETEX, fondée à la fois sur l'analyse des rapports de suivi réglementaires des différentes phases de développement des parcs éoliens en mer européens et sur la littérature grise disponible dans certains pays. Financée par l'Observatoire national de l'éolien en mer (ONEM), dispositif national d'appui à la connaissance et au suivi des effets environnementaux de l'éolien en mer, cette étude mobilise des retours d'expériences issus des suivis environnementaux réglementaires. Elle met en évidence plusieurs limites et lacunes dans les sources examinées :

- Des durées d'observation souvent limitées à quelques années ;
- Une efficacité des mesures d'évitement, de réduction et de compensation (ERC) encore insuffisamment démontrée ;
- L'absence de retours d'expérience sur la phase de démantèlement et sur les technologies flottantes ;
- Une prise en compte encore limitée des effets cumulés ;
- Une forte hétérogénéité des groupes biologiques étudiés.

Dans ce contexte, BIOTOPE (2025) formule plusieurs recommandations, parmi lesquelles :

- Le déploiement de suivis environnementaux sur l'ensemble de la phase d'exploitation, et non uniquement sur les premières années ;
- La publication systématique des données et des rapports de suivi, afin de permettre des analyses à l'échelle de plusieurs parcs et de constituer une base de données fiable et consolidée ;
- Le développement d'approches plus intégrées entre groupes biologiques, afin de mieux prendre en compte les interactions ;
- L'élaboration d'un cadre commun de recommandations à l'échelle européenne, portant sur les méthodes d'acquisition, d'analyse et de bancarisation des données.

Le rapport du groupe EKLIPSE (Cervantes *et al.*, 2025) a été commandé par la Direction générale de l'environnement (DG ENV) de la Commission européenne afin d'évaluer les effets du développement de l'éolien en mer sur l'atteinte du « bon état écologique ». EKLIPSE a ainsi conduit une revue systématique de la littérature fondée sur les descripteurs écologiques de la directive-cadre « Stratégie pour le milieu marin » (DCSMM) dans les eaux marines de l'Union européenne. L'analyse comprend une évaluation des effets cumulés considérés à trois niveaux : les interactions entre les parcs éoliens et les autres activités humaines ; les effets potentiels liés à la présence de plusieurs parcs éoliens ; les effets en cascade sur les écosystèmes. Le rapport souligne que la recherche sur les effets cumulés aux échelles spatio-temporelles écologiquement pertinentes demeure un domaine scientifique émergent, pour lequel les données probantes restent fragmentaires. EKLIPSE formule plusieurs recommandations afin de combler ces lacunes, notamment :

- Collecter des données probantes selon des protocoles de suivi harmonisés et sur le long terme afin d'évaluer les mesures d'atténuation intégrant les effets cumulés ;
- Intégrer les traits fonctionnels et la diversité biologique afin d'évaluer et de comparer les conséquences écologiques à l'échelle régionale ;
- Approfondir les connaissances sur un large éventail de taxons et évaluer les effets à l'échelle des populations, sur un nombre étendu de groupes biologiques, de sites et à des échelles spatiales larges, notamment transfrontalières ;
- Élaborer des plans détaillés de mise en œuvre du démantèlement intégrant les technologies disponibles ainsi que les évolutions technologiques futures ;
- Développer des approches globales, intégrées et de long terme, y compris par modélisation, afin d'évaluer et de gérer les effets des éoliennes en mer.

Conclusion et discussion

En conclusion, cette expertise scientifique collective fournit une base de connaissances scientifiques intégrée, solide et transparente, destinée à éclairer la décision publique relative aux effets du déploiement de l'éolien en mer sur la biodiversité. Les travaux analysés témoignent d'un accroissement continu des efforts de recherche, parallèlement à l'essor du déploiement des parcs éoliens en mer depuis une trentaine d'années. L'ESCo met en évidence des effets avérés de certaines pressions sur certains groupes biologiques, notamment l'effet obstacle chez les oiseaux, l'effet du bruit chez les mammifères marins et l'effet récif chez les organismes benthiques, tout en soulignant la nécessité de mieux caractériser et réduire les incertitudes, dans un milieu où les variabilités naturelles, inter-saisonnières et interannuelles, ainsi que les changements globaux peuvent compliquer la détection des effets induits par des pressions anthropiques locales.

Ces incertitudes tiennent d'abord aux lacunes persistantes de la littérature scientifique disponible. Elles portent notamment sur les effets cumulés, les effets à long terme et les effets à grande échelle, ainsi que sur certaines composantes clés de la biodiversité encore peu étudiées, telles que les producteurs primaires et certains macro-invertébrés de la colonne d'eau (méduses, copépodes, krill). L'expertise souligne également les limites de transposabilité des connaissances disponibles, en raison d'un effort de recherche principalement concentré sur

certaines technologies, certaines zones géographiques — la Chine étant par exemple très peu représentée malgré près de 50 % de la capacité mondiale installée —, ainsi que sur certaines espèces et certains types d'habitats. Si certaines combinaisons entre pressions et groupes biologiques bénéficient aujourd'hui d'un niveau de connaissance relativement robuste, les effets associés à plusieurs autres pressions demeurent encore insuffisamment documentés. En conséquence, l'état actuel des connaissances ne permet pas encore de disposer d'une évaluation intégrée de l'ensemble des effets des parcs éoliens en mer sur la biodiversité marine.

Au-delà de ces lacunes, l'ESCO met également en évidence plusieurs discussions scientifiques encore ouvertes. Par exemple, la distinction entre un effet d'attraction des organismes mobiles, c'est-à-dire une concentration locale d'organismes dans et autour des parcs éoliens sans augmentation de la production globale, et un effet de production, correspondant à une augmentation réelle de la production biologique de ces organismes, reste discutée. Si certains résultats suggèrent un effet de production, à travers des modifications des régimes alimentaires, une croissance accrue ou une survie améliorée, le lien de causalité avec une augmentation nette à l'échelle des populations ou des écosystèmes nécessite des travaux complémentaires pour être établi. Ces deux processus coexistent probablement, mais leur importance relative dépend de nombreux facteurs, tels que les espèces considérées, les caractéristiques des structures, l'âge du parc ou la pression de pêche locale.

Une autre discussion importante concerne le choix des options de démantèlement des parcs, qu'il soit partiel ou total, en raison du manque de recul et de preuves directes permettant d'en évaluer les effets environnementaux. Des recommandations et des stratégies de recherche à court terme sont ainsi proposées dans la littérature scientifique afin d'intégrer les dimensions écologiques, réglementaires et économiques dans l'évaluation des risques associés aux différents scénarios de démantèlement.

Dans un contexte de déploiement massif et de long terme de l'éolien en mer, l'analyse globale des pressions exercées par les parcs éoliens et de leurs effets, potentiels ou avérés, sur la biodiversité marine suggère que des transformations durables des écosystèmes marins sont vraisemblables. Cette perspective est d'autant plus importante que les différentes pressions peuvent interagir entre elles ainsi qu'avec d'autres pressions anthropiques déjà présentes dans les espaces marins, générant des effets cumulés susceptibles de dépasser la simple addition des effets observés localement. Les besoins de recherche relatifs à l'atténuation des effets, à leur cumul et à l'intégration socio-écologique des parcs éoliens en mer demeurent donc particulièrement importants.

Les publications scientifiques analysées traitent d'un ensemble de réponses techniques, de gestion et de planification s'inscrivant dans le cadre de la séquence réglementaire « Éviter – Réduire – Compenser » (ERC). Si ces mesures ne couvrent pas l'ensemble des effets observés, plusieurs d'entre elles sont discutées dans la littérature scientifique pour certaines combinaisons pression-groupe biologique spécifiques. Des mesures d'évitement ont ainsi été proposées, par exemple à travers le positionnement des parcs éoliens afin de limiter l'effet obstacle pour l'avifaune ou la perte d'habitat pour certains macro-invertébrés benthiques. Des mesures de réduction visant à limiter l'effet obstacle pour la faune volante ou les émissions sonores affectant les mammifères marins ont quant à elles été testées. Enfin, certaines mesures de compensation ont été testées, notamment en s'appuyant sur l'effet récif, à travers l'utilisation de substrats favorisant la colonisation par des espèces natives.

Ces constats rejoignent l'analyse complémentaire menée par BIOTOPE (2025) à partir des rapports de suivi réglementaires et de la littérature grise disponibles sur les parcs éoliens européens. En particulier, l'efficacité encore insuffisamment démontrée des mesures ERC mises en œuvre de manière ciblée par les opérateurs souligne la nécessité de suivis environnementaux portant sur l'ensemble de la durée de vie des parcs, afin de mesurer leur efficacité en conditions réelles. L'ESCO souligne ainsi le caractère encore récent de ce champ de recherche, malgré l'accroissement du nombre de travaux et de synthèses au cours des dernières années (Gulka *et al.*, 2026), ainsi que le besoin de méthodes harmonisées d'évaluation des pertes et des gains écologiques, adaptées aux objectifs de la séquence ERC.

La question de la transposabilité des résultats aux écosystèmes marins de France hexagonale constitue un autre enjeu majeur en raison du nombre restreint de publications scientifiques portant sur des sites d'étude hexagonaux à la date de clôture de la revue systématique de l'ESCO. La transposabilité est en partie rendue possible par certaines similarités entre les sites d'étude d'Europe du Nord, de l'Atlantique Nord et les façades françaises. Toutefois, les eaux de France hexagonale présentent une grande diversité de contextes écologiques, hydrodynamiques et bathymétriques, ce qui complexifie la transposabilité des résultats, notamment en

Méditerranée. Des lacunes et incertitudes concernant certaines combinaisons pression–groupe biologique et certains types d’habitats constituent également des facteurs limitants. À cela s’ajoutent des différences de contextes réglementaires et socio-économiques, susceptibles d’influencer l’interprétation et la transférabilité des résultats.

La comparaison des résultats entre différents contextes et la réalisation de méta-analyses seraient facilitées par la mise en place de protocoles harmonisés et de jeux de données comparables à l’échelle internationale (Brabant *et al.*, 2015 ; Gusatu *et al.*, 2021). Cet objectif suppose également de faciliter l’accès des communautés scientifiques aux parcs éoliens en mer ainsi qu’aux données issues des suivis environnementaux réalisés par les opérateurs, afin de favoriser la production de connaissances comparables, reproductibles et mobilisables à plus grande échelle. Cette exigence est d’autant plus forte que les choix industriels et technologiques évoluent rapidement. Les futurs parcs seront implantés dans des zones plus profondes, avec un passage progressif des éoliennes posées vers des éoliennes majoritairement flottantes, dont les effets restent encore peu documentés. Par ailleurs, la taille des turbines continue d’augmenter, même si cette évolution doit être mise en perspective avec le fait qu’un même niveau de production énergétique pourra être assuré par un nombre plus limité d’éoliennes.

Ces enjeux de transposabilité et de précaution prennent une importance particulière au regard de la superposition entre parcs éoliens en mer et zones bénéficiant d’un statut de protection. Compte tenu des effets documentés aux différentes échelles spatiales, mieux comprendre les interactions entre parcs éoliens en mer et Aires Marines Protégées (AMP) constitue un enjeu majeur. Cet enjeu est d’autant plus important que certains travaux récents indiquent que le développement des parcs éoliens peut entrer en tension avec les objectifs de conservation (Lloret *et al.*, 2023).

Plus largement, l’ESCO souligne le besoin d’adopter des approches intégrées, dépassant les analyses en silo par pressions, récepteurs biologiques ou projets, afin de s’inscrire dans une vision holistique des socio-écosystèmes. Cette intégration peut notamment s’appuyer sur de nouvelles méthodes d’observation plus globales de la biodiversité fonctionnelle, permettant d’améliorer l’identification des espèces ainsi que le suivi de leur distribution et de leur comportement. Elle gagnerait également à renforcer l’opérationnalisation du cadre d’analyse fondé sur les Variables essentielles de la biodiversité (EBV) et les Variables océaniques essentielles (EOV) (Revelard *et al.*, 2022 ; Schmeller *et al.*, 2018). Cette approche pourrait enfin s’appuyer sur le développement de modèles écosystémiques, constituant des briques des jumeaux numériques, afin d’explorer différents scénarios dans un cadre de planification des usages, d’évaluation des effets cumulés et de mise en œuvre de mesures d’atténuation.

Enfin, les recherches gagneraient à intégrer davantage les enjeux de co-usages des zones côtières dans une approche systémique, incluant à la fois la viabilité des activités socio-économiques (Bonsu *et al.*, 2024), les stratégies d’atténuation (Kingma *et al.*, 2024 ; Richards et Moore, 2026 ; Degraer *et al.*, 2026) et les objectifs de conservation définis par la Convention sur la Diversité Biologique, dans le Cadre mondial de la biodiversité de Kunming-Montréal (CBD, 2022).

GLOSSAIRE

A

Absence d'effet

Résultat indiquant qu'aucune modification mesurable n'est mise en évidence pour un récepteur biologique exposé à une pression donnée. Elle ne doit pas être confondue avec une preuve définitive d'absence d'effet.

Absence de preuve / preuve d'absence

Distinction entre le manque de données permettant de démontrer un effet et la démonstration robuste qu'un effet n'est pas observé.

Affouillement

Érosion localisée des sédiments autour d'une structure immergée, sous l'effet des courants et des turbulences à proximité du fond.

Anodes galvaniques / sacrificielles

Dispositifs métalliques utilisés pour protéger les structures immergées contre la corrosion par réaction électrochimique.

Approche intégrée

Approche consistant à analyser conjointement plusieurs pressions, groupes biologiques, phases de développement ou échelles d'analyse. Elle vise à dépasser une analyse fragmentée des effets.

Article / étude

Un article correspond à une publication scientifique unique. Une étude correspond ici à une unité d'analyse issue d'une combinaison « pression × groupe biologique » effectivement étudiée dans un article.

B

Bathymétrie

Description du relief et de la profondeur des fonds marins.

Battage de pieux

Technique d'installation consistant à enfoncer un pieu dans le fond marin par impacts répétés lors de la phase de construction. Cette opération peut générer un bruit impulsionnel intense.

Bioaccumulation

Accumulation progressive d'une substance dans les organismes vivants. Elle peut concerner certains contaminants présents dans l'eau, les sédiments ou les réseaux trophiques.

Biodiversité fonctionnelle

Dimension de la biodiversité liée aux rôles écologiques, aux fonctions et aux traits des organismes au sein des écosystèmes.

Biofilm

Ensemble de micro-organismes fixés à une surface et inclus dans une matrice organique qu'ils produisent. Les biofilms constituent souvent les premières étapes de colonisation des substrats immergés.

Bruit chronique

Bruit continu ou répété dans le temps. Dans le contexte des parcs éoliens en mer, il peut notamment être associé à la phase d'exploitation, à la maintenance ou au trafic maritime.

Bruit impulsionnel

Bruit bref, intense et discontinu. Le battage de pieux constitue un exemple de source de bruit impulsionnel en milieu marin.

C

Cartographie de la littérature

Analyse descriptive du corpus permettant de caractériser la répartition des études selon les pressions, groupes biologiques, zones géographiques, phases de développement et méthodes.

Champ électromagnétique (CEM)

Association du champ électrique et du champ magnétique générés par le passage du courant électrique dans les câbles sous-marins.

Céphalopodes

Classe de mollusques marins comprenant notamment les calmars, seiches, poulpes et nautilles.

Chiroptères

Ordre de mammifères volants regroupant les chauves-souris.

Codage

Procédure consistant à extraire et structurer de manière standardisée les informations clés des publications. Il permet de comparer les études selon des catégories communes.

Colonne d'eau

Ensemble des masses d'eau comprises entre la surface et le fond marin.

Combinaison « pression × groupe biologique »

Unité d'analyse croisant une pression donnée avec un groupe biologique exposé à cette pression.

Compensation

Mesure mise en œuvre pour contrebalancer des effets résiduels significatifs qui n'ont pu être ni évités ni suffisamment réduits. Elle vise à maintenir ou restaurer des fonctionnalités écologiques.

Composition de la communauté

Ensemble des espèces présentes dans une communauté biologique et leurs abondances relatives.

Composition génétique

Variabilité des gènes au sein des populations et entre populations. Elle renseigne notamment sur la diversité génétique et le potentiel adaptatif des espèces.

Connectivité écologique

Degré de connexion entre habitats, populations ou écosystèmes permettant les déplacements d'organismes et les flux écologiques.

Connectivité fonctionnelle

Capacité effective des organismes à se déplacer entre habitats en fonction de leurs caractéristiques biologiques et comportementales.

Connectivité génétique

Échanges de gènes entre populations, généralement liés aux déplacements, à la reproduction ou à la dispersion des individus.

Contaminants

Substances introduites dans l'environnement pouvant altérer la qualité de l'eau, des sédiments ou des organismes. Elles peuvent provenir notamment de matériaux, peintures, anodes, lubrifiants ou activités maritimes.

Controverse scientifique

Situation dans laquelle les résultats, interprétations ou méthodes disponibles conduisent à des conclusions divergentes. Elle peut refléter des différences de contextes, d'approches ou de niveaux de preuve.

Corpus

Ensemble structuré des publications scientifiques retenues pour l'analyse après application de critères de sélection définis. Il constitue la base documentaire principale de la revue systématique.

Co-usage

Partage d'un même espace entre plusieurs activités humaines. En mer, il peut concerner la coexistence entre parcs éoliens, pêche, transport, conservation ou autres usages.

Critères d'éligibilité

Critères définis en amont pour déterminer quelles publications peuvent être incluses ou exclues du corpus analysé. Ils assurent la cohérence et la transparence de la sélection des articles.

Cumul d'effets / Effet cumulé

Effet résultant de l'interaction entre plusieurs pressions exercées sur une composante écologique, à différentes échelles spatiales, temporelles ou biologiques. Ces interactions peuvent être additives, synergiques, antagonistes ou indirectes.

Cycle biogéochimique

Circulation et transformation des éléments chimiques dans les écosystèmes. Ces cycles peuvent concerner, par exemple, les nutriments, l'oxygène ou la matière organique.

D

Données primaires

Données issues directement d'observations, de mesures ou d'expérimentations originales. Elles se distinguent des données de synthèse ou d'interprétation secondaire.

Données probantes

Connaissances issues de travaux scientifiques ou d'observations documentées, mobilisées pour étayer une analyse ou une conclusion. Leur robustesse dépend notamment de la qualité, de la quantité et de la cohérence des données disponibles.

E

Écholocalisation

Capacité de certains animaux à se repérer, communiquer ou localiser des proies grâce aux sons qu'ils émettent et perçoivent. Elle est notamment mobilisée par plusieurs mammifères marins et chiroptères.

Écotoxicité

Effets toxiques de substances chimiques sur les organismes, les populations ou les écosystèmes.

Effet

Modification mesurable de l'état d'un organisme, d'une population, d'un habitat ou d'un écosystème en réponse à une pression. Dans cette expertise, le terme est privilégié pour conserver une qualification descriptive et non normative.

Effet additif

Forme de cumul dans laquelle les effets de plusieurs pressions s'additionnent sans interaction renforçante ou atténuante. Il se distingue des effets synergiques et antagonistes.

Effet aigu

Effet apparaissant rapidement après une exposition brève et souvent intense. Il est notamment pertinent pour les pressions fortes et temporaires, comme certaines phases de construction.

Effet barrière

Modification des déplacements d'organismes liée à la présence d'une structure ou d'un ensemble de structures. Elle peut entraîner des changements de trajectoire, d'usage de l'espace ou d'accès aux habitats.

Effet chronique

Effet résultant d'une exposition prolongée ou répétée dans le temps. Il est particulièrement pertinent pour les pressions persistantes associées à la phase d'exploitation.

Effet cocktail

Effet combiné de plusieurs substances chimiques dont les interactions peuvent modifier les effets individuels. Il peut conduire à des effets additifs, synergiques ou antagonistes.

Effet collision

Contact direct entre un organisme et une structure, pouvant entraîner des blessures ou de la mortalité. Il concerne notamment la faune volante exposée aux pales ou aux structures aériennes.

Effet d'attraction

Concentration d'organismes autour d'une structure sans augmentation démontrée de la production biologique globale. Il se distingue de l'effet de production.

Effet de « pas japonais » (« *stepping-stone* »)

Dispersion progressive d'espèces via une succession de structures ou d'habitats intermédiaires, selon une dynamique de proche en proche.

Effet de production

Augmentation réelle de la production biologique, par exemple via la croissance, la reproduction ou la survie. Il implique un accroissement de la production globale, et non une simple concentration locale d'individus.

Effet en cascade

Propagation indirecte d'un effet à travers les interactions écologiques, notamment au sein des réseaux trophiques. Un effet initial peut ainsi entraîner des modifications à d'autres niveaux de l'écosystème.

Effet indirect

Effet qui ne résulte pas directement d'une pression sur un récepteur, mais se transmet par des interactions écologiques, physiques ou socio-écologiques. Il peut concerner, par exemple, les réseaux trophiques ou les usages humains affectant la biodiversité.

Effet mixte

Situation dans laquelle les résultats disponibles montrent à la fois des effets et des absences d'effet selon les espèces, contextes, méthodes ou conditions étudiées. Cette catégorie rend compte de la variabilité des résultats.

Effet récif

Colonisation de structures artificielles par des organismes marins, pouvant modifier les habitats, les communautés et les interactions écologiques. Cet effet peut être associé à l'introduction de substrats durs dans des milieux dominés par des substrats meubles.

Effet relais de dispersion

Facilitation des déplacements ou de la dispersion d'espèces par des structures intermédiaires jouant un rôle de support ou de relais entre habitats.

Effet réserve

Effet lié à la réduction ou à l'interdiction de certaines activités humaines, notamment la pêche, dans une zone donnée. Il peut modifier l'abondance, la distribution ou la structure des communautés biologiques.

Effets résiduels

Effets qui subsistent après la mise en œuvre des mesures d'évitement et de réduction. Ils constituent le champ d'application potentiel des mesures de compensation.

Effet subléta

Effet n'entraînant pas la mort de l'organisme, mais affectant certaines fonctions biologiques. Il peut concerner, par exemple, la croissance, la reproduction, la physiologie ou le comportement.

Effet tamponné

Interaction entre plusieurs pressions conduisant à un effet combiné inférieur à la somme de leurs effets individuels. Il s'agit d'une forme possible de cumul d'effets.

Élasmobranches

Poissons cartilagineux comprenant notamment les requins et les raies. Certains peuvent être sensibles aux champs électriques ou magnétiques.

Éléments traces métalliques (ETMs)

Métaux présents à de faibles concentrations dans l'environnement, naturellement ou du fait des activités humaines. Certains peuvent devenir toxiques pour les organismes lorsqu'ils s'accumulent dans les milieux ou les chaînes trophiques.

Ensouillage

Technique consistant à enterrer un câble sous-marin dans les sédiments. Elle vise notamment à protéger le câble et à réduire certaines interactions avec les usages ou les habitats.

Espèces benthodémersales

Espèces vivant à proximité du fond marin et exploitant à la fois les habitats benthiques et la colonne d'eau proche du fond.

Espèces benthopélagiques

Espèces utilisant à la fois les habitats benthiques et pélagiques au cours de leur cycle de vie ou de leurs activités biologiques.

Espèces démersales

Espèces vivant et se déplaçant principalement à proximité du fond marin, sans être strictement associées au substrat.

Espèce non indigène

Espèce introduite hors de son aire de répartition naturelle. Son installation peut être favorisée par les transports maritimes, les infrastructures ou la disponibilité de nouveaux habitats.

Espèces sessiles / mobiles

Les espèces sessiles sont fixées au substrat, tandis que les espèces mobiles sont capables de se déplacer.

Évitement

Mesure consistant à supprimer une pression ou à empêcher l'exposition d'un récepteur biologique. Elle peut reposer sur des choix de localisation, de conception, de calendrier ou de technologie.

F

Faune volante

Ensemble des espèces capables de voler, notamment les oiseaux et les chiroptères.

Fonctionnement de l'écosystème

Ensemble des processus biologiques, physiques et chimiques assurant la dynamique d'un écosystème. Il inclut notamment la production, les cycles de matière et les interactions entre organismes.

Fragmentation écologique

Division ou isolement d'habitats ou de populations pouvant limiter les déplacements, les flux écologiques ou la connectivité. Elle peut s'exprimer à différentes échelles spatiales.

G

Gain écologique

Amélioration mesurable d'un état écologique ou d'une fonctionnalité écologique résultant d'une action de gestion, de restauration ou de compensation. Il suppose une comparaison avec un état de référence ou une trajectoire attendue.

Granulométrie

Répartition de la taille des particules composant un sédiment ou un substrat.

Groupe biologique

Regroupement opérationnel d'organismes partageant des caractéristiques écologiques, fonctionnelles ou taxonomiques pertinentes pour l'analyse.

Groupe taxonomique / taxon

Unité de classification biologique, comme l'espèce, le genre ou la famille. Un groupe biologique ne correspond pas nécessairement à un groupe taxonomique strict.

H

Habitat benthique / pélagique

Un habitat benthique correspond au milieu du fond marin, tandis qu'un habitat pélagique correspond à la colonne d'eau.

Habitat de recrutement

Milieu favorable à l'installation et au développement de jeunes individus après leur phase larvaire.

Hypothèse d'effet

Mécanisme attendu par lequel une pression est susceptible d'entraîner une modification mesurable d'un récepteur biologique. Elle sert de cadrage analytique sans préjuger des résultats observés.

I

Impact¹

Interprétation des effets observés au regard d'objectifs écologiques, réglementaires ou de gestion. Contrairement à l'effet, il implique une appréciation dépendante du contexte et du référentiel mobilisé.

Incertitude

Limitation des connaissances disponibles liée à un manque de données, à des divergences de résultats, à des limites méthodologiques ou à la variabilité des contextes étudiés.

Introduction primaire / dispersion secondaire

L'introduction primaire correspond à l'arrivée initiale d'une espèce dans une nouvelle zone. La dispersion secondaire désigne sa propagation après installation.

L

Lacune de connaissance

Absence ou insuffisance de données disponibles pour documenter une question scientifique, un effet, une pression, un groupe biologique ou un contexte. Elle limite la robustesse des conclusions pouvant être tirées.

Littérature complémentaire

Publications mobilisées en appui du corpus principal afin d'éclairer certaines pressions peu documentées, de mettre les résultats en perspective ou d'apporter des éléments de contexte complémentaires à l'analyse. Elle n'entre pas dans le corpus principal analysé de manière systématique.

Littérature grise

Ensemble des documents produits hors des circuits habituels d'édition scientifique et de diffusion commerciale, par exemple par des administrations, organismes, associations ou acteurs privés. Elle comprend notamment des rapports institutionnels, thèses, études, synthèses ou actes de conférences.

Littérature scientifique

Ensemble des publications produites selon des méthodes explicites et diffusées dans des revues ou ouvrages spécialisés. Dans cette expertise, elle renvoie aux articles évalués par les pairs et publiés dans des revues à comité de lecture.

¹ Cette définition générique de l'« impact » est propre à la présente ESCo. Elle se distingue de l'acception retenue dans les guides ministériels relatifs aux procédures d'autorisation des installations de production d'énergies renouvelables en mer, où la notion d'impact renvoie à une définition spécifique inscrite dans le cadre réglementaire de l'évaluation environnementale (cf. *Énergies renouvelables en mer : la réforme de l'autorisation à « caractéristiques variables » – Guide d'application*, avril 2022).

M

Macro-invertébrés benthiques

Invertébrés visibles à l'œil nu vivant sur ou dans les fonds marins. Ils incluent notamment certains crustacés, mollusques, annélides, échinodermes, cnidaires ou éponges.

Macro-invertébrés pélagiques

Invertébrés visibles à l'œil nu vivant dans la colonne d'eau. Ils comprennent notamment certains crustacés, méduses, cténophores ou autres organismes planctoniques de grande taille.

Magnétoréception / électroréception

Capacité de certains organismes à détecter des champs magnétiques ou électriques. Elle peut intervenir dans l'orientation, la navigation ou la détection de proies.

Mammifères marins

Mammifères vivant en milieu marin, comprenant notamment les cétacés et les pinnipèdes.

Masquage acoustique

Perturbation de la perception des sons biologiquement utiles par le bruit ambiant. Il peut affecter la communication, l'orientation ou la détection de proies.

Mélange vertical

Brassage des masses d'eau entre différentes profondeurs. Il influence notamment la distribution des nutriments, de l'oxygène et des organismes dans la colonne d'eau.

Mesure d'atténuation

Action visant à limiter les effets environnementaux associés à une activité ou à une pression. Elle inclut notamment les mesures d'évitement, de réduction et, le cas échéant, de compensation.

Mesure d'évitement / réduction / compensation (ERC)

Hiérarchie des actions visant à éviter, réduire puis compenser les effets environnementaux. Elle structure l'élaboration des mesures d'atténuation.

Méta-analyse

Méthode d'analyse statistique consistant à combiner quantitativement les résultats de plusieurs études indépendantes portant sur une même question scientifique.

Mosaïque d'habitats

Organisation spatiale de différents habitats interconnectés au sein d'un paysage. Elle peut influencer les déplacements, la connectivité et la distribution des espèces.

N

Niveau de confiance

Appréciation de la robustesse d'une connaissance, tenant compte de la quantité, de la qualité, de la cohérence et de la transférabilité des données disponibles. Il permet de qualifier le degré d'incertitude associé aux résultats.

P

Panache turbide

Zone d'eau chargée en particules en suspension résultant d'une perturbation des sédiments. Il peut modifier localement la turbidité, la pénétration de la lumière et certaines conditions écologiques.

Paysage marin

Ensemble d'écosystèmes marins connectés à différentes échelles spatiales. Il permet d'analyser des effets dépassant l'échelle locale d'un site ou d'une structure.

PECOc

Cadre de formulation d'une question de revue systématique structuré autour de la Population, de l'Exposition, du Comparateur, du Résultat (« Outcome ») et du contexte. Il guide la stratégie de recherche bibliographique et les critères d'éligibilité.

Peintures antifouling

Revêtements appliqués sur les structures immergées afin de limiter la fixation et le développement d'organismes marins.

Phénologie

Étude des événements saisonniers du cycle de vie des organismes, comme la migration, la reproduction ou la floraison, en lien avec les conditions environnementales.

Phytoplancton / zooplancton

Le phytoplancton regroupe des organismes microscopiques photosynthétiques en suspension, tandis que le zooplancton regroupe des organismes animaux planctoniques. Ces compartiments jouent un rôle important dans les réseaux trophiques marins.

Planification spatiale marine

Organisation des usages en mer à différentes échelles spatiales et temporelles. Elle vise à articuler les activités humaines, la préservation des écosystèmes et les objectifs de gestion.

Poissons téléostéens

Poissons osseux représentant la majorité des espèces de poissons. Ils se distinguent des poissons cartilagineux, comme les requins et les raies.

Population d'espèces

Ensemble d'individus d'une même espèce vivant dans une zone donnée.

Pression

Mécanisme par lequel une activité humaine modifie les caractéristiques physiques, chimiques ou biologiques du milieu au-delà de leur variabilité naturelle. Une pression peut conduire à un effet mesurable sur un récepteur biologique.

Pression analogue

Pression comparable à celle étudiée, mobilisée pour éclairer les effets potentiels lorsque les données directes sont limitées. Elle permet d'appuyer l'interprétation par analogie.

Production primaire

Production de matière organique par les organismes photosynthétiques. Elle constitue une base importante du fonctionnement des réseaux trophiques marins.

R

Récepteur biologique

Composante du vivant susceptible d'être exposée à une pression, comme un organisme, une population, un habitat ou un écosystème. Il constitue l'objet sur lequel un effet peut être observé.

Réduction

Mesure visant à diminuer l'intensité, la durée, la fréquence ou l'étendue spatiale d'une pression lorsque son évitement complet n'est pas possible. Elle intervient après l'évitement dans la séquence Éviter – Réduire – Compenser (ERC).

Remise en suspension des sédiments

Mise en mouvement de particules du fond marin dans la colonne d'eau. Elle peut modifier la turbidité, la qualité de l'eau ou les habitats benthiques.

Réseau trophique

Ensemble des relations alimentaires entre organismes au sein d'un écosystème.

Résilience écologique

Capacité d'un écosystème, d'un habitat ou d'une population à absorber une perturbation et à retrouver tout ou partie de son fonctionnement. Elle dépend du contexte écologique et de l'intensité des pressions.

Restauration écologique

Processus visant à favoriser le rétablissement des structures, fonctions et dynamiques d'un écosystème dégradé. Elle peut être mobilisée dans le cadre de mesures de gestion ou de compensation.

Revue systématique de la littérature

Méthode de synthèse des connaissances fondée sur une recherche exhaustive, des critères explicites de sélection et un traitement standardisé des publications. Elle vise à produire des résultats transparents, reproductibles et moins exposés aux biais.

Robustesse des connaissances

Degré de fiabilité des conclusions scientifiques au regard de la quantité, de la qualité et de la cohérence des données disponibles. Elle conditionne le niveau de confiance accordé aux résultats.

S

« Sato-umi »

Concept japonais de gestion intégrée des espaces côtiers fondé sur la recherche d'interactions équilibrées entre activités humaines et écosystèmes marins. Il vise à maintenir les fonctions écologiques tout en soutenant les usages et les communautés locales.

Séquence Éviter – Réduire – Compenser (ERC)

Hiérarchie d'action visant à limiter les effets environnementaux d'un projet, en privilégiant d'abord l'évitement, puis la réduction et enfin la compensation des effets résiduels. Elle structure la conception des mesures d'atténuation.

Services écosystémiques

Bénéfices que les écosystèmes procurent aux sociétés humaines. Ils peuvent inclure des fonctions d'approvisionnement, de régulation, de soutien ou des bénéfices culturels.

Shifting baseline / syndrome de la référence glissante

Tendance à considérer comme état de référence des conditions écologiques déjà modifiées par des pressions anthropiques antérieures. Elle peut influencer l'interprétation des effets et des trajectoires écologiques.

Socio-écosystème

Système intégrant les interactions entre les écosystèmes marins et côtiers et les activités humaines. Dans le cadre de cette expertise, les dimensions socio-écosystémiques sont considérées dès lors qu'elles peuvent influencer directement ou indirectement la biodiversité, notamment lorsque l'implantation de parcs éoliens modifie d'autres usages ou activités ayant eux-mêmes des effets sur celle-ci.

Solution fondée sur la nature

Action visant à protéger, gérer durablement ou restaurer des écosystèmes afin de répondre à des enjeux environnementaux et sociétaux. Elle doit produire des bénéfices pour la biodiversité.

Stratification de la colonne d'eau

Organisation verticale des masses d'eau selon leurs propriétés physiques ou chimiques, comme la température, la salinité ou la densité. Elle influence les échanges entre couches d'eau et les processus biologiques.

Structure de l'écosystème

Organisation spatiale et composition des habitats, des communautés et des compartiments écologiques. Elle constitue l'une des dimensions de l'état de la biodiversité.

Substrat meuble / dur / artificiel

Un substrat meuble est composé de sédiments, un substrat dur de roche ou de matériaux consolidés, et un substrat artificiel d'une structure introduite par l'être humain. Ces substrats offrent des conditions d'habitat différentes.

T

Traits des organismes

Caractéristiques biologiques influençant le fonctionnement, les réponses et les interactions des organismes. Ils peuvent concerner la morphologie, la physiologie, le comportement, la reproduction ou le régime alimentaire.

Transposabilité

Capacité à mobiliser des résultats obtenus dans un contexte donné pour éclairer un autre contexte écologique, géographique, technologique ou réglementaire. Elle dépend notamment des similarités entre sites, pressions, méthodes et récepteurs étudiés.

Turbidité

Trouble de l'eau lié à la présence de particules en suspension. Elle peut modifier la pénétration de la lumière et affecter certains organismes ou processus écologiques.

V

Variable essentielle de biodiversité (EBV)

Variable mesurable permettant de suivre l'état et l'évolution de la biodiversité à différents niveaux d'organisation biologique. Dans cette expertise, les EBV servent de cadre pour caractériser les réponses de la biodiversité aux pressions étudiées.

Variabilité contextuelle

Variation des effets observés selon les caractéristiques écologiques, géographiques, technologiques ou méthodologiques des études. Elle explique en partie les différences de résultats entre contextes.

Z

Zone intertidale / subtidale

La zone intertidale correspond à l'espace situé entre les niveaux de marée, tandis que la zone subtidale reste immergée. Ces zones présentent des conditions écologiques différentes.

Zone de non-prélèvement

Zone dans laquelle certaines activités extractives, comme la pêche, sont interdites. Elle peut modifier les usages et les dynamiques écologiques locales.

SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ACV	Analyse de cycle de vie
ALAN	Artificial Light At Night
AMP	Aire marine protégée
APP	Appui aux politiques publiques
BAG	Before/After Gradient
CBD	Convention on Biological Diversity / Convention sur la diversité biologique
CCNUCC	Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques
CEE	Collaboration for Environmental Evidence
CEM	Champ électromagnétique
CGDD	Commissariat général au développement durable
CNRS	Centre national de la recherche scientifique
DCSMM	Directive-cadre Stratégie pour le milieu marin
DG ENV	Direction générale de l'environnement de la Commission européenne
EBV	Essential Biodiversity Variables / Variables essentielles de biodiversité
ECV	Essential Climate Variables / Variables essentielles du climat
ENI	Espèce non indigène
EOV	Essential Ocean Variables / Variables océaniques essentielles
ERC	Éviter – Réduire – Compenser
ESCO	Expertise scientifique collective
ETMs	Éléments traces métalliques
FAIR	Findable, Accessible, Interoperable, Reusable
GCOS	Global Climate Observing System
GEO BON	Group on Earth Observations Biodiversity Observation Network
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GIZC	Gestion intégrée des zones côtières
GWEC	Global Wind Energy Council
IFREMER	Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer
IPBES	Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques
MNHN	Muséum national d'Histoire naturelle
MPES	Mission pour l'expertise scientifique
ONEM	Observatoire national de l'éolien en mer
PECOc	Population, Exposition, Comparateur, Outcome / Résultat, contexte
PFAS	Substances per- et polyfluoroalkylées
PSM	Planification spatiale maritime
RBINS	Institute of Natural Sciences
RSL	Revue systématique de la littérature
SNCRR	Sites naturels de compensation, de restauration et de renaturation
SNGA	Strategic Net Gain Assessments
UICN	Union internationale pour la conservation de la nature

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES CITÉES

Andersson, M. H., & Öhman, M. C. (2010). Fish and sessile assemblages associated with wind-turbine constructions in the Baltic Sea. *Marine and Freshwater Research*, 61(6), 642–650. <https://doi.org/10.1071/MF09117>

Baguley, T. (2004). Understanding statistical power in the context of applied research. *Applied Ergonomics*, 35(2), 73–80. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2004.01.002>

Bailey, H., Senior, B., Simmons, D., Rusin, J., Picken, G., & Thompson, P. M. (2010). Assessing underwater noise levels during pile-driving at an offshore windfarm and its potential effects on marine mammals. *Marine Pollution Bulletin*, 60(6), 888–897. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.01.003>

Barbut, L., Vastenhou, B., Vigin, L., Degraer, S., Volckaert, F. A. M., & Lacroix, G. (2020). The proportion of flatfish recruitment in the North Sea potentially affected by offshore windfarms. *ICES Journal of Marine Science*, 77(3), 1227–1237. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsz050>

Barrillon, S., Fuchs, R., Petrenko, A. A., Comby, C., Bosse, A., Yohia, C., Fuda, J.-L., Bhairy, N., Doglioli, A. M., Gregori, G., Tzortzis, R., D'Ovidio, F., & Thyssen, M. (2023). Phytoplankton reaction to an intense storm in the north-western Mediterranean Sea. *Biogeosciences*, 20(1), 141–161. <https://doi.org/10.5194/bg-20-141-2023>

Bell, A. M., Au, M., Regnery, J., Schmid, M., Meermann, B., Reifferscheid, G., Ternes, T., & Buchinger, S. (2020). Does galvanic cathodic protection by aluminum anodes impact marine organisms? *Environmental Sciences Europe*, 32(1). <https://doi.org/10.1186/s12302-020-00441-3>

Biotope. (2025). *Retours d'expériences sur le suivi des effets des parcs éoliens en mer étrangers sur la biodiversité — Phase 3 : Méthodes de suivi, effets des parcs éoliens en mer sur la biodiversité et mesures ERC*. Office français de la biodiversité, 194 p.

Bohnsack, J. A. (1989). Are high densities of fishes at artificial reefs: The result of habitat limitation or behavioral preference? *Bulletin of Marine Science*, 44(2), 631–645.

Bonnel, J., Chauvaud, S., Chauvaud, L., Mars, J., Mathias, D., & Olivier, F. (2022). *Effets des sons anthropiques sur la faune marine : cas des projets éoliens offshore*. Éditions Quæ, 168 p. <https://doi.org/10.35690/978-2-7592-3545-2>

Bonsu, P. O., Letschert, J., Yates, K. L., Svendsen, J. C., Berkenhagen, J., Rozemeijer, M. J. C., Kerkhove, T. R. H., Rehren, J., & Stelzenmüller, V. (2024). Co-location of fisheries and offshore wind farms: Current practices and enabling conditions in the North Sea. *Marine Policy*, 159. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2023.105941>

Brabant, R., Vanermen, N., Stienen, E. W. M., & Degraer, S. (2015). Towards a cumulative collision risk assessment of local and migrating birds in North Sea offshore wind farms. *Hydrobiologia*, 756(1), 63–74. <https://doi.org/10.1007/s10750-015-2224-2>

Brandt, M., Diederichs, A., Betke, K., & Nehls, G. (2011). Responses of harbour porpoises to pile driving at the Horns Rev II offshore wind farm in the Danish North Sea. *Marine Ecology Progress Series*, 421, 205–216. <https://doi.org/10.3354/meps08888>

Brandt, M., Dragon, A., Diederichs, A., Bellmann, M., Wahl, V., Piper, W., Nabe-Nielsen, J., & Nehls, G. (2018). Disturbance of harbour porpoises during construction of the first seven offshore wind farms in Germany. *Marine Ecology Progress Series*, 596, 213–232. <https://doi.org/10.3354/meps12560>

Brandt, M., Höschle, C., Diederichs, A., Betke, K., Matuschek, R., & Nehls, G. (2013). Seal scarers as a tool to deter harbour porpoises from offshore construction sites. *Marine Ecology Progress Series*, 475, 291–302. <https://doi.org/10.3354/meps10100>

Bray, L., Reizopoulou, S., Voukouvalas, E., Soukissian, T., Alomar, C., Vazquez-Luis, M., Deudero, S., Attrill, M. J., & Hall-Spencer, J. M. (2016). Expected effects of offshore wind farms on Mediterranean marine life. *Journal of Marine Science and Engineering*, 4(1). <https://doi.org/10.3390/jmse4010018>

Brignon, J. M., Lejart, M., Nexer, M., Michel, S., Quentric, A., & Thiebaud, L. (2022). A risk-based method to prioritize cumulative impacts assessment on marine biodiversity and research policy for offshore wind farms in France. *Environmental Science & Policy*, 128, 264–276. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.12.003>

Brodin, Y., & Andersson, M. (2009). The marine splash midge *Telmatogon japonicus* (Diptera; Chironomidae)—extreme and alien? *Biological Invasions*, 11(6), 1311–1317. <https://doi.org/10.1007/s10530-008-9338-7>

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. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2012.10.016>

- Buyse, J., Hostens, K., Degraer, S., & Backer, A. (2022). Offshore wind farms affect the spatial distribution pattern of plaice *Pleuronectes platessa* at both the turbine and wind farm scale. *ICES Journal of Marine Science*, 79(6). <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsac107>
- Buyse, J., Hostens, K., Degraer, S., Troch, M., Wittoeck, J., & Backer, A. (2023). Increased food availability at offshore wind farms affects trophic ecology of plaice *Pleuronectes platessa*. *Science of the Total Environment*, 862, 160730. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160730>
- Buyse, J., Reubens, J., Hostens, K., Degraer, S., Goossens, J., & Backer, A. (2025). European plaice movements show evidence of high residency, site fidelity, and feeding around hard substrates within an offshore wind farm. *ICES Journal of Marine Science*, 82(4), fsad179. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsad179>
- Caboni, M., Schwarz, A. E., Slot, H., & Mijle Meijer, H. (2025). Estimating microplastic emissions from offshore wind turbine blades in the Dutch North Sea. *Wind Energy Science*, 10, 1123–1136. <https://doi.org/10.5194/wes-10-1123-2025>
- Carpenter, J. R., Williams, K. A., & Jenkins, E. (2021). *Environmental Stratification Workgroup Report for the State of the Science Workshop on Wildlife and Offshore Wind Energy 2020: Cumulative Impacts*. Report to the New York State Energy Research and Development Authority (NYSDERDA).
- Carstensen, J., Henriksen, O., & Teilmann, J. (2006). Impacts of offshore wind farm construction on harbour porpoises: Acoustic monitoring of echolocation activity using porpoise detectors (T-PODs). *Marine Ecology Progress Series*, 321, 295–308. <https://doi.org/10.3354/meps321295>
- CBD. (1992). *Convention sur la diversité biologique*. Rio de Janeiro, Brésil.
- CBD. (2022). *Décision adoptée par la Conférence des Parties à la Convention sur la diversité biologique à sa quinzième réunion : Cadre mondial de la biodiversité de Kunming-Montréal* (154 p.).
- Cervantes, A., Pace, F., Gallaou, E., Kadiri, M., Velázquez, J., Fernandes, M., Langridge, J., Scott, A. J., Sieber, I. M., Bhatia, S., Fuente, D., Maureaud, A. A., & Dajka, J. (2025). *State of knowledge regarding the impacts of offshore wind farm expansion: What are the consequences for achieving Good Environmental Status across European marine waters?* Report prepared by an Eclipse Expert Working Group. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17064612>
- Chen, Y., & Lee, P. (2023). Developing cetacean-friendly guidelines, from whale watching to offshore wind farm operation. *Frontiers in Marine Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1215905>
- Christiansen, N., Daewel, U., Djath, B., & Schrum, C. (2022). Emergence of large-scale hydrodynamic structures due to atmospheric offshore wind farm wakes. *Frontiers in Marine Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.818501>
- Claudet, J., Osenberg, C. W., Domenici, P., Badalamenti, F., Milazzo, M., Falcón, J. M., Bertocci, I., Benedetti-Cecchi, L., García-Charton, J.-A., Goñi, R., Borg, J. A., Forcada, A., Lucia, A., Pérez-Ruzafa, Á., Afonso, P., Brito, A., Guala, I., Le Diréach, L., Sanchez-Jerez, P., & Planes, S. (2010). Fish traits and marine reserve effects. *Bulletin of the Ecological Society of America*, 91(2), 226–229.
- 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). <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12529>
- Coates, D. A., Deschutter, Y., Vincx, M., & Vanaverbeke, J. (2014). Enrichment and shifts in macrobenthic assemblages in an offshore wind farm area in the Belgian part of the North Sea. *Marine Environmental Research*, 95, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2013.12.008>
- Coates, D. A., Kapasakali, D. A., Vincx, M., & Vanaverbeke, J. (2016). Short-term effects of fishery exclusion in offshore wind farms on macrofaunal communities in the Belgian part of the North Sea. *Fisheries Research*, 179, 131–138. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2016.02.019>
- Coates, D., Hoey, G., Colson, L., Vincx, M., & Vanaverbeke, J. (2015). Rapid macrobenthic recovery after dredging activities in an offshore wind farm in the Belgian part of the North Sea. *Hydrobiologia*, 756(1), 3–18. <https://doi.org/10.1007/s10750-014-2103-2>
- Cook, A., Williams, K. A., Jenkins, E., Gulka, J., & Liner, J. (2021). *Bird Workgroup Report for the State of the Science Workshop on Wildlife and Offshore Wind Energy 2020: Cumulative Impacts*. Report to the New York State Energy Research and Development Authority (NYSDERDA).
- Coolen, J. W. P., Lengkeek, W., Degraer, S., Kerckhof, F., Kirkwood, R. J., & Lindeboom, H. J. (2016). Distribution of the invasive *Caprella mutica* Schurin, 1935 and native *Caprella linearis* (Linnaeus, 1767) on artificial hard substrates in the North Sea: Separation by habitat. *Aquatic Invasions*, 11(4), 437–449. <https://doi.org/10.3391/ai.2016.11.4.08>

Cranford, P. J., Li, W., Strand, Ø., & Strohmeier, T. (2008). Phytoplankton depletion by mussel aquaculture: High resolution mapping, ecosystem modeling and potential indicators of ecological carrying capacity. *ICES Journal of Marine Science*, 65(Suppl. 1), 1–10.

Critchley, E. J., Nilsson, A., Helberg, M., & May, R. (2025). Life-cycle impact assessment of offshore wind energy development on migrating bird diversity in the North Sea. *Journal of Applied Ecology*, 62(7). <https://doi.org/10.1111/1365-2664.70087>

Daewel, U., Akhtar, N., Christiansen, N., & Schrum, C. (2022). Offshore wind farms are projected to impact primary production and bottom water deoxygenation in the North Sea. *Communications Earth & Environment*, 3(1). <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00625-0>

Dähne, M., Tougaard, J., Carstensen, J., Rose, A., & Nabe-Nielsen, J. (2017). Bubble curtains attenuate noise from offshore wind farm construction and reduce temporary habitat loss for harbour porpoises. *Marine Ecology Progress Series*, 580, 221–237. <https://doi.org/10.3354/meps12257>

Dallet, M., Amouroux, I., Duarte, R., Dufois, F., Dussauze, M., Gonzalez, J. L., Grouhel, A., & Menet, F. (2024). *Évaluation du risque pour les habitats benthiques lié au cumul des rejets issus des systèmes anticorrosion présents au sein des parcs EMR : zone baie de Seine élargie*. Rapport final du projet PolluEcume. Ineris–Ifremer, 95 p.

Dalton, D., Berger, V., Kirchmeir, H., Adams, V., Botha, J., Halloy, S., Hart, R., Švara, V., Ribeiro, K. T., & Chaudhary, S. (2024). *A framework for monitoring biodiversity in protected areas and other effective area-based conservation measures: Concepts, methods and technologies* (IUCN WCPA Technical Report Series). <https://doi.org/10.2305/HRAP7908>

Dannheim, J., Bergström, L., Birchenough, S. N. R., Brzana, R., Boon, A. R., Coolen, J. W. P., Dauvin, J.-C., de Mesel, I., Derweduwen, J., Gill, A. B., Hutchison, Z. L., Jackson, A. C., Janas, U., Martin, G., Raoux, A., Reubens, J., Rostin, L., Vanaverbeke, J., Wilding, T. A., & Degraer, S. (2020). Benthic effects of offshore renewables: Identification of knowledge gaps and urgently needed research. *ICES Journal of Marine Science*, 77(3). <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsz018>

Danovaro, R., Bianchelli, S., Brambilla, P., Brussa, G., Corinaldesi, C., Borghi, A. D., Dell’Anno, A., Fraschetti, S., Greco, S., Grosso, M., Nepote, E., Rigamonti, L., & Boero, F. (2024). Making eco-sustainable floating offshore wind farms: Siting, mitigations, and compensations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 197, 114386. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114386>

de Backer, A., Buyse, J., & Hostens, K. (2020). Chapter 7: A decade of soft sediment epibenthos and fish monitoring at the Belgian offshore wind farm area. In *Environmental Impacts of Offshore Wind Farms in the Belgian Part of the North Sea: Empirical Evidence Inspiring Priority Monitoring. Research and Management*.

de Backer, A., Polet, H., Sys, K., Vanelslander, B., & Hostens, K. (2019). Chapter 4: Fishing activities in and around Belgian offshore wind farms: Trends in effort and landings over the period 2006–2017. In *Environmental Impacts of Offshore Wind Farms in the Belgian Part of the North Sea: Marking a Decade of Monitoring (Research and Innovation)*, pp. 31–46).

de Borger, E., Oevelen, D. van, Mavraki, N., Backer, A. de, Braeckman, U., Soetaert, K., & Vanaverbeke, J. (2025). Offshore wind farms modify coastal food web dynamics by enhancing suspension feeder pathways. *Communications Earth & Environment*, 6(1), 330. <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02253-w>

Degraer, S., Cornacchia, L., Ziemba, A., Agardy, T., Burg, S. W. K., Braak, K., Duren, L. A., Declercq, A., Eggermont, M., Gerven, A., Kerkhove, T. R. H., Moulart, I., Patel, T., Petersen, J. K., Poelman, M., Stratigaki, V., Strothotte, E., Vanaverbeke, J., & Serafy, G. E. (2026). Rethinking the responsible application of nature-inclusive design in marine infrastructure to restore ecosystems and enhance biodiversity. *ICES Journal of Marine Science*, 83(4). <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsag050>

Degraer, S., Hutchison, Z. L., LoBue, C., Williams, K. A., Gulka, J., & Jenkins, E. (2021). *Benthos Workgroup Report for the State of the Science Workshop on Wildlife and Offshore Wind Energy 2020: Cumulative Impacts*. Report to the New York State Energy Research and Development Authority (NYSERDA), 45 p.

Delavaud, A., Milleret, E., Wroza, S., Soubelet, H., Deligny, A., & Silvain, J.-F. (2021). *Indicateurs et outils de mesure*. Fondation pour la recherche sur la biodiversité. <https://doi.org/10.5281/zenodo.16572162>

de Leeuw van Weenen, C., Knoop, J., Rossi, B., Appels, L., & Larché, N. (2026). Differential sensitivity of *Saccharina latissima* (Phaeophyceae) to emissions from corrosion protection systems informs biomonitoring strategies. *Frontiers in Marine Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fmars.2026.1805764>

de Leeuw van Weenen, C., Larché, N., Rossi, B., Pinori, E., & Appels, L. (2026). Quantifying trace metal contamination from marine cathodic protection using *Saccharina latissima* in laboratory and mesocosm exposure experiments. *Marine Pollution Bulletin*, 226, 119362. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2026.119362>

de Mesel, I., Kerckhof, F., Norro, A., Rumes, B., & Degraer, S. (2015). Succession and seasonal dynamics of the epifauna community on offshore wind farm foundations and their role as stepping stones for non-indigenous species. *Hydrobiologia*, 756(1), 37–50. <https://doi.org/10.1007/s10750-014-2157-1>

- Demmer, J., Lewis, M., Robins, P., & Neill, S. (2022). Evidence of potential synergy between aquaculture and offshore renewable energy. *International Marine Energy Journal*, 5(2), 133–141. <https://doi.org/10.36688/imej.5.133-141>
- Derweduwen, J., Ranson, J., Wittoeck, J., & Hostens, K. (2016). *Feeding behaviour of lesser weever (Echiichthys vipera) and dab (Limanda limanda) in the C-Power wind farm*.
- Durning, B., & Broderick, M. (2019). Development of cumulative impact assessment guidelines for offshore wind farms and evaluation of use in project making. *Impact Assessment and Project Appraisal*, 37(2), 124–138. <https://doi.org/10.1080/14615517.2018.1498186>
- Ebeling, A., Wippermann, D., Zimmermann, T., Klein, O., Kirchgeorg, T., Weinberg, I., Plass, A., Hasenbein, S., & Präfrock, D. (2025). Coupling metal concentrations and drift simulations for tracing emissions from offshore wind farms. *Marine Pollution Bulletin*, 214, 117810. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.117810>
- Edgar, G. J., Stuart-Smith, R. D., Willis, T. J., Kininmonth, S., Baker, S. C., Banks, S., Barrett, N. S., Becerro, M. A., Bernard, A. T. F., Berkhout, J., Buxton, C. D., Campbell, S. J., Cooper, A. T., Davey, M., Edgar, S. C., Försterra, G., Galván, D. E., Irigoyen, A. J., Kushner, D. J., & Thomson, R. J. (2014). Global conservation outcomes depend on marine protected areas with five key features. *Nature*, 506(7487), 216–220. <https://doi.org/10.1038/nature13022>
- Edrén, S. M. C., Andersen, S. M., Teilmann, J., Carstensen, J., Harders, P. B., Dietz, R., & Miller, L. A. (2009). The effect of a large Danish offshore wind farm on harbor and gray seal haul-out behavior. *Marine Mammal Science*, 26(3), 614–634. <https://doi.org/10.1111/j.1748-7692.2009.00364.x>
- Edwards-Jones, A., Williams, S. C. L., Smith, C. L., & Beaumont, N. J. (2024). Stakeholder insights into embedding marine net gain for offshore wind farm planning and delivery. *Environmental Challenges*, 14, 100814. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100814>
- Erbe, C., Houser, D., Bowles, A., & Porter, M. B. (2025). *Marine Mammal Acoustics in a Noisy Ocean*. Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-77022-7>
- Farr, H., Ruttenberg, B., Walter, R. K., Wang, Y. H., & White, C. (2021). Potential environmental effects of deepwater floating offshore wind energy facilities. *Ocean & Coastal Management*, 207, 105611. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105611>
- Filgueira, R., Guyondet, T., Comeau, L. A., & Tremblay, R. (2016). Bivalve aquaculture–environment interactions in the context of climate change. *Global Change Biology*, 22(12), 3901–3913. <https://doi.org/10.1111/gcb.13346>
- Floeter, J., Beusekom, J. E. E. van, Auch, D., Callies, U., Carpenter, J., Dudeck, T., Eberle, S., Eckhardt, A., Gloe, D., Hanselmann, K., Hufnagl, M., Janssen, S., Lenhart, H., Möller, K. O., North, R. P., Pohlmann, T., Riethmüller, R., Schulz, S., Spreizenbarth, S., & Möllmann, C. (2017). Pelagic effects of offshore wind farm foundations in the stratified North Sea. *Progress in Oceanography*, 156, 154–173. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2017.07.003>
- Freitas, R., Costa, S., Cardoso, C. E. D., Morais, T., Moleiro, P., Matias, A. C., Pereira, A. F., Machado, J., Correia, B., Pinheiro, D., Rodrigues, A., Colonia, J., Soares, A. M. V. M., & Pereira, E. (2020). Toxicological effects of the rare earth element neodymium in *Mytilus galloprovincialis*. *Chemosphere*, 244, 125457. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125457>
- 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), 1–8. <https://doi.org/10.1038/s44183-022-00003-5>
- Gardner, J., Zbawicka, M., Westfall, K., & Wenne, R. (2016). Invasive blue mussels threaten regional scale genetic diversity in mainland and remote offshore locations: The need for baseline data and enhanced protection in the Southern Ocean. *Global Change Biology*, 22(9), 3182–3195. <https://doi.org/10.1111/gcb.13332>
- Gartman, V., Bulling, L., Dahmen, M., Geißler, G., & Koppel, J. (2016). Mitigation measures for wildlife in wind energy development, consolidating the state of knowledge—Part 1: Planning and siting, construction. *Journal of Environmental Assessment Policy and Management*, 18(3). <https://doi.org/10.1142/S1464333216500137>
- 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.
- Gilles, A., Scheidat, M., & Siebert, U. (2009). Seasonal distribution of harbour porpoises and possible interference of offshore wind farms in the German North Sea. *Marine Ecology Progress Series*, 383, 295–307. <https://doi.org/10.3354/meps08020>
- Goodale, M., & Milman, A. (2020). Assessing cumulative exposure of Northern Gannets to offshore wind farms. *Wildlife Society Bulletin*, 44(2), 252–259. <https://doi.org/10.1002/wsb.1087>

- Graham, I. M., Gillespie, D., Gkikopoulou, K. C., Hastie, G. D., & Thompson, P. M. (2023). Directional hydrophone clusters reveal evasive responses of small cetaceans to disturbance during construction at offshore wind farms. *Biology Letters*, 19(1), 20220101. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2022.0101>
- Graham, I. M., Merchant, N. D., Farcas, A., Barton, T. R., Cheney, B., Bono, S., & Thompson, P. M. (2019). Harbour porpoise responses to pile-driving diminish over time. *Royal Society Open Science*, 6(6), 190335. <https://doi.org/10.1098/rsos.190335>
- Guarinello, M. L., & Carey, D. A. (2022). Multi-modal approach for benthic impact assessments in moraine habitats: A case study at the Block Island Wind Farm. *Estuaries and Coasts*, 45(4). <https://doi.org/10.1007/s12237-020-00818-w>
- Gulka, J., Knapp, S., Soccorsi, A., Avery-Gomm, S., Knaga, P., & Williams, K. A. (2026). *Strategies for mitigating impacts to birds and bats from offshore wind energy development: Available evidence and data gaps*. <https://doi.org/10.1101/2024.08.20.608845>
- Gusatu, L. F., Menegon, S., Depellegrin, D., Zuidema, C., Faaij, A., & Yamu, C. (2021). Spatial and temporal analysis of cumulative environmental effects of offshore wind farms in the North Sea basin. *Scientific Reports*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-89537-1>
- GWEC. (2025). *Global Wind Report 2025*. Global Wind Energy Council.
- Hague, E. L., Sparling, C. E., Morris, C., Vaughan, D., Walker, R., Culloch, R. M., Lyndon, A. R., Fernandes, T. F., & McWhinnie, L. H. (2022). Same space, different standards: A review of cumulative effects assessment practice for marine mammals. *Frontiers in Marine Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.822467>
- Hall, R., Topham, E., & João, E. (2022). Environmental impact assessment for the decommissioning of offshore wind farms. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 165, 112580. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112580>
- Halouani, G., Villanueva, C. M., Raoux, A., Dauvin, J.-C., Lasram, F. B., Foucher, E., Le Loc'h, F., Safi, G., Araignous, E., Robin, J.-P., & Niquil, N. (2020). A spatial food web model to investigate potential spillover effects of a fishery closure in an offshore wind farm. *Journal of Marine Systems*, 212, 103434. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2020.103434>
- Halpern, B. S., & Warner, R. R. (2002). Marine reserves have rapid and lasting effects. *Ecology Letters*, 5(3), 361–366. <https://doi.org/10.1046/j.1461-0248.2002.00326.x>
- Hammar, L., Wikström, A., & Molander, S. (2014). Assessing ecological risks of offshore wind power on Kattegat cod. *Renewable Energy*, 66, 414–424. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.12.024>
- Hart, N. S. (2001). The visual ecology of avian photoreceptors. *Progress in Retinal and Eye Research*, 20(5), 675–703. [https://doi.org/10.1016/S1350-9462\(01\)00009-x](https://doi.org/10.1016/S1350-9462(01)00009-x)
- Hastie, G. D., Russell, D. J. F., McConnell, B., Moss, S., Thompson, D., & Janik, V. M. (2015). Sound exposure in harbour seals during the installation of an offshore wind farm: Predictions of auditory damage. *Journal of Applied Ecology*, 52(3), 631–640. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12403>
- Heinänen, S., Žydelis, R., Kleinschmidt, B., Dorsch, M., Burger, C., Morkūnas, J., Quillfeldt, P., & Nehls, G. (2020). Satellite telemetry and digital aerial surveys show strong displacement of red-throated divers (*Gavia stellata*) from offshore wind farms. *Marine Environmental Research*, 160, 104989. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2020.104989>
- Hengstmann, E., Corella, P. Z., Alter, K., Belzunce-Segarra, M. J., Booth, A. M., Castro-Jiménez, J., Czerner, N., De Cauwer, K., Deviller, G., Gomiero, A., Goseberg, N., Hasenbein, S., Kirchgeorg, T., Mason, C., Pape, W., Parmentier, K., Plaß, A., Pröfrock, D., Sarhadi, A., & De Witte, B. (2025). Chemical emissions from offshore wind farms: From identification to challenges in impact assessment and regulation. *Marine Pollution Bulletin*, 215, 117915. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.117915>
- Huang, J., Huang, X., Song, N., Ma, Y., & Wei, D. (2022). Evaluation of the spatial suitability of offshore wind farm: A case study of the sea area of Liaoning Province. *Sustainability*, 14(1), 449. <https://doi.org/10.3390/su14010449>
- Huang, L.-F., Xu, X.-M., Yang, L.-L., Huang, S.-Q., Zhang, X.-H., & Zhou, Y.-L. (2023). Underwater noise characteristics of offshore exploratory drilling and its impact on marine mammals. *Frontiers in Marine Science*, 10, 1097701. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1097701>
- Hutchison, Z. L., Gill, A. B., Sigray, P., He, H. B., & King, J. W. (2020). Anthropogenic electromagnetic fields (EMF) influence the behaviour of bottom-dwelling marine species. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60793-x>
- Isaksson, N., Scott, B. E., Hunt, G. L., Benninghaus, E., Declerck, M., Gormley, K., Harris, C., Sjöstrand, S., Trifonova, N., Waggitt, J. J., Wihsgott, J. U., Williams, C., Zampollo, A., & Williamson, B. J. (2023). A paradigm for understanding whole ecosystem effects of offshore wind farms in shelf seas. *ICES Journal of Marine Science*. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsad194>

- Jakubowska, M., Urban-Malinga, B., Otremba, Z., & Andruliewicz, E. (2019). Effect of low frequency electromagnetic field on the behavior and bioenergetics of the polychaete *Hediste diversicolor*. *Marine Environmental Research*, 150, 104766. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2019.104766>
- Jakubowska-Lehrmann, M., Białowas, M., Otremba, Z., Hallmann, A., Śliwińska-Wilczewska, S., & Urban-Malinga, B. (2022). Do magnetic fields related to submarine power cables affect the functioning of a common bivalve? *Marine Environmental Research*, 179, 105700. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2022.105700>
- Janßen, H., Augustin, C. B., Hinrichsen, H.-H., & Kube, S. (2013). Impact of secondary hard substrate on the distribution and abundance of *Aurelia aurita* in the western Baltic Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 75(1–2), 224–234. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.07.027>
- Jonsson, P. R., Hammar, L., Wahlström, I., Pålsson, J., Hume, D., Almroth-Rosell, E., & Mattsson, M. (2021). Combining seascape connectivity with cumulative impact assessment in support of ecosystem-based marine spatial planning. *Journal of Applied Ecology*, 58(3), 576–586. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13813>
- Juhl, M., Hauschild, M. Z., & Dam-Johansen, K. (2024). Sustainability of corrosion protection for offshore wind turbine towers. *Progress in Organic Coatings*, 186, 107998. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.107998>
- Jung, J.-L., & Madon, B. (Éds.). (2021). *Protection des mammifères marins face aux activités humaines et nouvelles connaissances issues des études de l'ADN*. Éditions Pedone.
- Juretzek, C., Schmidt, B., & Boethling, M. (2021). Turning scientific knowledge into regulation: Effective measures for noise mitigation of pile driving. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(8), 819. <https://doi.org/10.3390/jmse9080819>
- Kastelein, R. A., Helder-Hoek, L., Gransier, R., Terhune, J. M., Jennings, N., & de Jong, C. A. F. (2015). Hearing thresholds of harbor seals (*Phoca vitulina*) for playbacks of seal scarer signals, and effects of the signals on behavior. *Hydrobiologia*, 756(1), 75–88. <https://doi.org/10.1007/s10750-014-2152-6>
- Kastelein, R. A., Hoek, L., Gransier, R., de Jong, C. A. F., Terhune, J. M., & Jennings, N. (2015). Hearing thresholds of a harbor porpoise (*Phocoena phocoena*) for playbacks of seal scarer signals, and effects of the signals on behavior. *Hydrobiologia*, 756(1), 89–103. <https://doi.org/10.1007/s10750-014-2035-x>
- Kingma, E. M., ter Hofstede, R., Kardinaal, E., Bakker, R., Bittner, O., van der Weide, B., & Coolen, J. W. P. (2024). Guardians of the seabed: Nature-inclusive design of scour protection in offshore wind farms enhances benthic diversity. *Journal of Sea Research*, 199, 102502. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2024.102502>
- Kirchgeorg, T., Weinberg, I., Hornig, M., Baier, R., Schmid, M. J., & Brockmeyer, B. (2018). Emissions from corrosion protection systems of offshore wind farms: Evaluation of the potential impact on the marine environment. *Marine Pollution Bulletin*, 136, 257–268. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.08.058>
- Knights, A. M., Koss, R. S., & Robinson, L. A. (2013). Identifying common pressure pathways from a complex network of human activities to support ecosystem-based management. *Ecological Applications*, 23, 755–765. <https://doi.org/10.1890/12-1137.1>
- Kotta, J., Fetissov, M., Szava-Kovats, R., Aps, R., & Martin, G. (2020). Online tool to integrate evidence-based knowledge into cumulative effects assessments: Linking human pressures to multiple nature assets. *Environmental Advances*, 2, 100026. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2020.100026>
- Kremers, D., López Marulanda, J., Hausberger, M., & Lemasson, A. (2014). Behavioural evidence of magnetoreception in dolphins: Detection of experimental magnetic fields. *Naturwissenschaften*, 101, 907–911. <https://doi.org/10.1007/s00114-014-1231-x>
- Krone, R., Dederer, G., Kanstinger, P., Kramer, P., Schneider, C., & Schmalenbach, I. (2017). Mobile demersal megafauna at common offshore wind turbine foundations in the German Bight (North Sea) two years after deployment—Increased production rate of *Cancer pagurus*. *Marine Environmental Research*, 123, 53–61. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2016.11.011>
- Krone, R., Gutow, L., Joschko, T. J., & Schröder, A. (2013). Epifauna dynamics at an offshore foundation—Implications of future wind power farming in the North Sea. *Marine Environmental Research*, 85, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2012.12.004>
- Kujala, H., Burgman, M. A., & Moilanen, A. (2013). Treatment of uncertainty in conservation under climate change. *Conservation Letters*, 6(2), 73–85. <https://doi.org/10.1111/j.1755-263X.2012.00299.x>
- Lagerveld, S., de Jonge Poerink, B., & Geelhoed, S. C. V. (2021). Offshore occurrence of a migratory bat, *Pipistrellus nathusii*, depends on seasonality and weather conditions. *Animals*, 11(12), 3442. <https://doi.org/10.3390/ani11123442>

- Lagerveld, S., Wilkes, T., van Puijenbroek, M. E. B., Noort, B. C. A., & Geelhoed, S. C. V. (2023). Acoustic monitoring reveals spatiotemporal occurrence of *Nathusius' pipistrelle* at the southern North Sea during autumn migration. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(9), 1016. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11590-2>
- Lecordier, E. M., Gernez, P., Mazik, K., York, K., & Forster, R. M. (2025). Quantification of turbid wakes in offshore wind farms using satellite remote sensing. *Science of the Total Environment*, 967, 178814. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.178814>
- Leiter, S., Stone, K., Thompson, J., Accardo, C., Wikgren, B., Zani, M., Cole, T., Kenney, R., Mayo, C., & Kraus, S. (2017). North Atlantic right whale *Eubalaena glacialis* occurrence in offshore wind energy areas near Massachusetts and Rhode Island, USA. *Endangered Species Research*, 34, 45–59. <https://doi.org/10.3354/esr00827>
- Lemasson, A. J., Somerfield, P. J., Schratzberger, M., & Knights, A. M. (2023). Challenges of evidence-informed offshore decommissioning: An environmental perspective. *Trends in Ecology & Evolution*, 38(8), 688–692. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2023.04.003>
- Lemasson, A. J., Somerfield, P. J., Schratzberger, M., Thompson, M. S. A., Firth, L. B., Couce, E., McNeill, C. L., Nunes, J., Pascoe, C., Watson, S. C. L., & Knights, A. M. (2024). A global meta-analysis of ecological effects from offshore marine artificial structures. *Nature Sustainability*, 7(4), 485–495. <https://doi.org/10.1038/s41893-024-01311-z>
- Lester, S. E., Halpern, B. S., Grorud-Colvert, K., Lubchenco, J., Ruttenberg, B. I., Gaines, S. D., Aïramé, S., & Warner, R. R. (2009). Biological effects within no-take marine reserves: A global synthesis. *Marine Ecology Progress Series*, 384, 33–46. <https://doi.org/10.3354/meps08029>
- Leung, W., Noble, B., Gunn, J., & Jaeger, J. A. G. (2015). A review of uncertainty research in impact assessment. *Environmental Impact Assessment Review*, 50, 116–123. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2014.09.005>
- Lipsky, A., Silva, A., Gilmour, F., Arjona, Y., Hogan, F., Lloret, J., Bolser, D., Haase, S., Oesterwind, D., Ten Brink, T., Roach, M., & Ford, K. (2025). Fisheries independent surveys in a new era of offshore wind energy development. *ICES Journal of Marine Science*, 82(3), fsae060. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsae060>
- Lloret, J., Turiel, A., Solé, J., Berdalet, E., Sabatés, A., Olivares, A., Gili, J.-M., Vila-Subirós, J., & Sardà, R. (2022). Unravelling the ecological impacts of large-scale offshore wind farms in the Mediterranean Sea. *Science of the Total Environment*, 824, 153803. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153803>
- Lloret, J., Wawrzynowski, P., Dominguez-Carrió, C., Sardà, R., Molins, C., Gili, J.-M., Sabatés, A., Vila-Subirós, J., García, L., Solé, J., Berdalet, E., Turiel, A., & Olivares, A. (2023). Floating offshore wind farms in Mediterranean marine protected areas: A cautionary tale. *ICES Journal of Marine Science*. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsad131>
- Lowell, R. B., Culp, J. M., & Dubé, M. G. (2000). A weight-of-evidence approach for Northern river risk assessment: Integrating the effects of multiple stressors. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 19(4), 1182–1190. <https://doi.org/10.1002/etc.5620190452>
- Luttikhuisen, P. C., Beermann, J., Crooijmans, R. P. M. A., Jak, R. G., & Coolen, J. W. P. (2019). Low genetic connectivity in a fouling amphipod among man-made structures in the southern North Sea. *Marine Ecology Progress Series*, 615, 133–142. <https://doi.org/10.3354/meps12929>
- Maar, M., Bolding, K., Petersen, J. K., Hansen, J. L. S., & Timmermann, K. (2009). Local effects of blue mussels around turbine foundations in an ecosystem model of Nysted offshore wind farm, Denmark. *Journal of Sea Research*, 62(2–3), 159–174. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2009.01.008>
- Maar, M., Holbach, A., Boderskov, T., Thomsen, M., Buck, B. H., Kotta, J., & Bruhn, A. (2023). Multi-use of offshore wind farms with low-trophic aquaculture can help achieve global sustainability goals. *Communications Earth & Environment*, 4(1). <https://doi.org/10.1038/s43247-023-01116-6>
- Maclean, I. M. D., Inger, R., Benson, D., Booth, C. G., Embling, C. B., Grecian, W. J., Heymans, J. J., Plummer, K. E., Shackshaft, M., Sparling, C. E., Wilson, B., Wright, L. J., Bradbury, G., Christen, N., Godley, B. J., Jackson, A. C., McCluskie, A., Nicholls-Lee, R., & Bearhop, S. (2014). Resolving issues with environmental impact assessment of marine renewable energy installations. *Frontiers in Marine Science*, 1, 75. <https://doi.org/10.3389/fmars.2014.00075>
- Malagoli, D., Gobba, F., & Ottaviani, E. (2003). Effects of 50-Hz magnetic fields on the signalling pathways of fMLP-induced shape changes in invertebrate immunocytes: The activation of an alternative “stress pathway”. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – General Subjects*, 1620(1), 185–190. [https://doi.org/10.1016/S0304-4165\(02\)00531-7](https://doi.org/10.1016/S0304-4165(02)00531-7)
- Masden, E. A., Haydon, D. T., Fox, A. D., & Furness, R. W. (2010). Barriers to movement: Modelling energetic costs of avoiding marine wind farms amongst breeding seabirds. *Marine Pollution Bulletin*, 60(7), 1085–1091. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.01.016>

- Masden, E. A., McCluskie, A., Owen, E., & Langston, R. H. W. (2015). Renewable energy developments in an uncertain world: The case of offshore wind and birds in the UK. *Marine Policy*, 51, 169–172. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2014.08.006>
- Mavraki, N., Coolen, J. W. P., Kapasakali, D. A., Degraer, S., Vanaverbeke, J., & Beermann, J. (2022). Small suspension-feeding amphipods play a pivotal role in carbon dynamics around offshore man-made structures. *Marine Environmental Research*, 178, 105664. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2022.105664>
- Mavraki, N., Degraer, S., & Vanaverbeke, J. (2021). Offshore wind farms and the attraction-production hypothesis: Insights from a combination of stomach content and stable isotope analyses. *Hydrobiologia*, 848(7), 1639–1657. <https://doi.org/10.1007/s10750-021-04553-6>
- May, R., Åström, J., Hamre, Ø., & Dahl, E. L. (2017). Do birds in flight respond to (ultra)violet lighting? *Avian Research*, 8(1), 33. <https://doi.org/10.1186/s40657-017-0092-3>
- May, R., Middel, H., Stokke, B. G., Jackson, C., & Verones, F. (2020). Global life-cycle impacts of onshore wind-power plants on bird richness. *Environmental and Sustainability Indicators*, 8, 100080. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2020.100080>
- Merchant, N. D. (2019). Underwater noise abatement: Economic factors and policy options. *Environmental Science & Policy*, 92, 116–123. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.11.014>
- Methratta, E. T. (2020). Monitoring fisheries resources at offshore wind farms: BACI vs. BAG designs. *ICES Journal of Marine Science*, 77(3), 890–900. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsaa026>
- Methratta, E. T. (2021). Distance-based sampling methods for assessing the ecological effects of offshore wind farms: Synthesis and application to fisheries resource studies. *Frontiers in Marine Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.674594>
- Mishnaevsky, L., Jr., Tempelis, A., Belahurau, Y., & Johansen, N. F.-J. (2024). Microplastics emission from eroding wind turbine blades: Preliminary estimations of volume. *Energies*, 17, 6260. <https://doi.org/10.3390/en17246260>
- MMO. (2023). *Understanding and Exploring Co-existence Opportunities and Displacement Issues: A report produced for the Marine Management Organisation*. MMO Project 1338, 144 p.
- Moore, C. J. (2008). Synthetic polymers in the marine environment: A rapidly increasing, long-term threat. *Environmental Research*, 108(2), 131–139. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2008.07.025>
- Nabe-Nielsen, J., van Beest, F. M., Grimm, V., Sibly, R. M., Teilmann, J., & Thompson, P. M. (2018). Predicting the impacts of anthropogenic disturbances on marine populations. *Conservation Letters*, 11(5). <https://doi.org/10.1111/conl.12563>
- Napper, I. E., Wright, L. S., Barrett, A. C., Parker-Jurd, F. N. F., & Thompson, R. C. (2022). Potential microplastic release from the maritime industry: Abrasion of rope. *Science of the Total Environment*, 804, 150155. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150155>
- Nehls, G., Rose, A., Diederichs, A., Bellmann, M., & Pehlke, H. (2016). Noise mitigation during pile driving efficiently reduces disturbance of marine mammals. In A. N. Popper & A. D. Hawkins (Éds.), *The Effects of Noise on Aquatic Life II* (Vol. 875, pp. 755–762). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2981-8_92
- Nicolette, J. P., Nelson, N. A., Rockel, M. K., Rockel, M. L., Testoff, A. N., Johnson, L. L., Williamson, L. D., & Todd, V. L. G. (2023). A framework for a net environmental benefit analysis based comparative assessment of decommissioning options for anthropogenic subsea structures: A North Sea case study. *Frontiers in Marine Science*, 9, 1020334. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.1020334>
- Noguès, Q., Bourdaud, P., Azaïs, E., Halouani, G., Lasram, F. B., Dauvin, J.-C., Le Loc'h, F., & Niquil, N. (2023). An ecosystem-wide approach for assessing the spatialized cumulative effects of local and global changes on coastal ecosystem functioning. *ICES Journal of Marine Science*, 80(4). <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsad043>
- Ottaviani, E., Malagoli, D., Ferrari, A., Tagliazucchi, D., Conte, A., & Gobba, F. (2002). 50 Hz magnetic fields of varying flux intensity affect cell shape changes in invertebrate immunocytes: The role of potassium ion channels. *Bioelectromagnetics*, 23(4), 292–297. <https://doi.org/10.1002/bem.10021>
- Papathanasopoulou, E., Queirós, A. M., Beaumont, N., Hooper, T., & Nunes, J. (2016). What evidence exists on the local impacts of energy systems on marine ecosystem services: A systematic map. *Environmental Evidence*, 5(1), 1–12. <https://doi.org/10.1186/s13750-016-0075-6>
- Paredes, G. M., & Vianello, A. (2025). Potential environmental impacts of marine renewable energy due to the release of microplastic particles from synthetic mooring cables. *Environmental Research Letters*, 20(5), 053004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/adc9cb>

- Pauly, D. (1995). Anecdotes and the shifting baseline syndrome of fisheries. *Trends in Ecology & Evolution*, 10(10), 430. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(00\)89171-5](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(00)89171-5)
- Pearce, B., Fariñas-Franco, J. M., Wilson, C., Pitts, J., de Burgh, A., & Somerfield, P. J. (2014). Repeated mapping of reefs constructed by *Sabellaria spinulosa* Leuckart, 1849 at an offshore wind farm site. *Continental Shelf Research*, 83, 3–13. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2014.02.003>
- Pereira, H. M., Ferrier, S., Walters, M., Geller, G. N., Jongman, R. H. G., Scholes, R. J., Bruford, M. W., Brummitt, N., Butchart, S. H. M., Cardoso, A. C., Coops, N. C., Dulloo, E., Faith, D. P., Freyhof, J., Gregory, R. D., Heip, C., Höft, R., Hurtt, G., Jetz, W., & Wegmann, M. (2013). Essential biodiversity variables. *Science*, 339(6117), 277–278. <https://doi.org/10.1126/science.1229931>
- Pezy, J.-P., Raoux, A., & Dauvin, J.-C. (2020). The environmental impact from an offshore wind farm: Challenge and evaluation methodology based on an ecosystem approach. *Ecological Indicators*, 114, 106302. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106302>
- Potlock, K. M., Temple, A. J., & Berggren, P. (2023). Offshore construction using gravity-base foundations indicates no long-term impacts on dolphins and harbour porpoise. *Marine Biology*, 170(8), 92. <https://doi.org/10.1007/s00227-023-04240-1>
- Proença, V., Martin, L. J., Pereira, H. M., Fernandez, M., McRae, L., Belnap, J., Böhm, M., Brummitt, N., García-Moreno, J., Gregory, R. D., Honrado, J. P., Jürgens, N., Opige, M., Schmeller, D. S., Tiago, P., & van Swaay, C. A. M. (2017). Global biodiversity monitoring: From data sources to Essential Biodiversity Variables. *Biological Conservation*, 213, 256–263. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.07.014>
- Puts, M., Kempf, A., Möllmann, C., & Taylor, M. (2023). Trade-offs between fisheries, offshore wind farms and marine protected areas in the southern North Sea: Winners, losers and effective spatial management. *Marine Policy*, 152, 105574. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2023.105574>
- Quintana-Rizzo, E., Leiter, S., Cole, T., Hagbloom, M., Knowlton, A., Nagelkirk, P., O'Brien, O., Khan, C., Henry, A., Duley, P., Crowe, L., Mayo, C., & Kraus, S. (2021). Residency, demographics, and movement patterns of North Atlantic right whales *Eubalaena glacialis* in an offshore wind energy development area in southern New England, USA. *Endangered Species Research*, 45, 251–268. <https://doi.org/10.3354/esr01137>
- Raoux, A., Dambacher, J. M., Pezy, J.-P., Mazé, C., Dauvin, J.-C., & Niquil, N. (2018). Assessing cumulative socio-ecological impacts of offshore wind farm development in the Bay of Seine (English Channel). *Marine Policy*, 89, 11–20. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2017.12.007>
- Raoux, A., Lassalle, G., Pezy, J.-P., Tecchio, S., Safi, G., Ernande, B., Mazé, C., Le Loc'h, F., Lequesne, J., Girardin, V., Dauvin, J.-C., & Niquil, N. (2019). Measuring sensitivity of two OSPAR indicators for a coastal food web model under offshore wind farm construction. *Ecological Indicators*, 96, 728–738. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.07.014>
- Raoux, A., Tecchio, S., Pezy, J.-P., Lassalle, G., Degraer, S., Wilhelmsson, D., Cachera, M., Ernande, B., Le Guen, C., Haraldsson, M., Grangeré, K., Le Loc'h, F., Dauvin, J.-C., & Niquil, N. (2017). Benthic and fish aggregation inside an offshore wind farm: Which effects on the trophic web functioning? *Ecological Indicators*, 72, 33–46. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.07.037>
- Rebke, M., Dierschke, V., Weiner, C. N., Aumüller, R., Huettmann, 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. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.02.029>
- Regan, H. M., Colyvan, M., & Burgman, M. A. (2002). A taxonomy and treatment of uncertainty for ecology and conservation biology. *Ecological Applications*, 12(2), 618–628. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2002\)012\[0618:ATATOU\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2002)012[0618:ATATOU]2.0.CO;2)
- Reubens, J. T., Degraer, S., & Vincx, M. (2011). Aggregation and feeding behaviour of pouting (*Trisopterus luscus*) at wind turbines in the Belgian part of the North Sea. *Fisheries Research*, 108(1), 223–227. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2010.11.025>
- Reubens, J. T., Pasotti, F., Degraer, S., & Vincx, M. (2013). Residency, site fidelity and habitat use of Atlantic cod (*Gadus morhua*) at an offshore wind farm using acoustic telemetry. *Marine Environmental Research*, 90, 128–135. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2013.07.001>
- Révelard, A., Tintoré, J., Verron, J., Bahurel, P., Barth, J. A., Belbéoch, M., Benveniste, J., Bonnefond, P., Chassignet, E. P., Cravatte, S., Davidson, F., de Young, B., Heupel, M., Heslop, E., Hörstmann, C., Karstensen, J., Le Traon, P.-Y., Marques, M., McLean, C., & Williams, B. (2022). Ocean integration: The needs and challenges of effective coordination within the ocean observing system. *Frontiers in Marine Science*, 8, 737671. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.737671>
- McLean, C., & Williams, B. (2022). Ocean integration: The needs and challenges of effective coordination within the ocean observing system. *Frontiers in Marine Science*, 8, 737671. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.737671>
- Richards, K., & Moore, P. J. (2025). The biodiversity benefits of marine artificial structures: A global meta-analysis with implications for offshore wind farms and nature-inclusive design. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.6265088>

- Roach, M., Cohen, M., Forster, R., Revill, A. S., & Johnson, M. (2018). The effects of temporary exclusion of activity due to wind farm construction on a lobster (*Homarus gammarus*) fishery suggests a potential management approach. *ICES Journal of Marine Science*, 75(4). <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsy006>
- Rothery, P., Newton, I., & Little, B. (2009). Observations of seabirds at offshore wind turbines near Blyth in northeast England. *Bird Study*, 56(1), 1–14. <https://doi.org/10.1080/00063650802648093>
- Sala, E., & Giakoumi, S. (2018). No-take marine reserves are the most effective protected areas in the ocean. *ICES Journal of Marine Science*, 75(3), 1166–1168. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsx059>
- Sanz, D. S., García, S., Trueba-Castañeda, L., Boullosa-Falces, D., & Trueba, A. (2024). Antifouling and anticorrosive protection of renewable energy marine structures with TiO₂-based enamel. *TransNav: The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 18(2), 419–424. <https://doi.org/10.12716/1001.18.02.21>
- Schaffeld, T., Schnitzler, J. G., Ruser, A., Woelfing, B., Baltzer, J., & Siebert, U. (2020). Effects of multiple exposures to pile driving noise on harbor porpoise hearing during simulated flights—An evaluation tool. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 147(2), 685–697. <https://doi.org/10.1121/10.0000595>
- Schmeller, D. S., Weatherdon, L. V., Loyau, A., Bondeau, A., Brotons, L., Brummitt, N., Geijzendorffer, I. R., Haase, P., Küemmerlen, M., Martin, C. S., Mihoub, J.-B., Rocchini, D., Saarenmaa, H., Stoll, S., & Regan, E. C. (2018). A suite of essential biodiversity variables for detecting critical biodiversity change. *Biological Reviews*, 93(1), 55–71. <https://doi.org/10.1111/brv.12332>
- Schwemmer, P., Mercker, M., Häcker, K., Krückenberg, H., Kämpfer, S., Böcker, P., Franks, S., Elts, J., Marja, R., Piha, M., Rousseau, P., Pedersen, R., Düttmann, H., Fartmann, T., Garthe, S., Fort, J., & Jiguet, F. (2023). Behavioral responses to offshore wind farms during migration of a declining shorebird species revealed by GPS telemetry. *Journal of Environmental Management*, 342, 118131. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118131>
- Scott, K., Harsanyi, P., Easton, B. A. A., Piper, A. J. R., Rochas, C. M. V., & Lyndon, A. R. (2021). Exposure to electromagnetic fields (EMF) from submarine power cables can trigger strength-dependent behavioural and physiological responses in edible crab, *Cancer pagurus* (L.). *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(7), 776. <https://doi.org/10.3390/jmse9070776>
- Shields, M. A., & Payne, A. I. L. (2014). *Marine Renewable Energy Technology and Environmental Interactions*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-8002-5>
- Sigray, P., Linné, M., Andersson, M. H., Nöjd, A., Persson, L. K. G., Gill, A. B., & Thomsen, F. (2022). Particle motion observed during offshore wind turbine piling operation. *Marine Pollution Bulletin*, 180, 113734. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113734>
- Skov, H., Desholm, M., Heinänen, S., Kahlert, J. A., Laubek, B., Jensen, N. E., Žydelis, R., & Jensen, B. P. (2016). Patterns of migrating soaring migrants indicate attraction to marine wind farms. *Biology Letters*, 12(12), 20160804. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2016.0804>
- Smyth, K., Christie, N., Burdon, D., Atkins, J. P., Barnes, R., & Elliott, M. (2015). Renewables-to-reefs? Decommissioning options for the offshore wind power industry. *Marine Pollution Bulletin*, 90(1–2), 247–258. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.10.045>
- Southall, B. L., Finneran, J. J., Reichmuth, C., Nachtigall, P. E., Ketten, D. R., Bowles, A. E., Ellison, W. T., Nowacek, D. P., & Tyack, P. L. (2019). Marine mammal noise exposure criteria: Updated scientific recommendations for residual hearing effects. *Aquatic Mammals*, 45(2), 125–232. <https://doi.org/10.1578/AM.45.2.2019.125>
- Stelzenmüller, V., Fock, H. O., Gimpel, A., Rambo, H., Diekmann, R., Probst, W. N., Callies, U., Bockelmann, F., Neumann, H., & Kröncke, I. (2015). Quantitative environmental risk assessments in the context of marine spatial management: Current approaches and some perspectives. *ICES Journal of Marine Science*, 72(3), 1022–1042. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsu206>
- Stelzenmüller, V., Gimpel, A., Haslob, H., Letschert, J., Berkenhagen, J., & Brüning, S. (2021). Sustainable co-location solutions for offshore wind farms and fisheries need to account for socio-ecological trade-offs. *Science of the Total Environment*, 776, 145918. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145918>
- Szostek, C. L., Edwards-Jones, A., Beaumont, N. J., & Watson, S. C. L. (2024). Primary vs grey: A critical evaluation of literature sources used to assess the impacts of offshore wind farms. *Environmental Science & Policy*, 154, 103693. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2024.103693>
- Tamburri, M. N., Soon, Z. Y., Scianni, C., Øpstad, C. L., Oxtoby, N. S., Doran, S., & Drake, L. A. (2022). Understanding the potential release of microplastics from coatings used on commercial ships. *Frontiers in Marine Science*, 9, 1074654. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.1074654>

- ter Hofstede, R., Witte, S., Kamermans, P., van Koningsveld, M., & Tonk, L. (2024). Settlement success of European flat oyster (*Ostrea edulis*) on different types of hard substrate to support reef development in offshore wind farms. *Ecological Engineering*, 200, 107189. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2024.107189>
- Thomassen, J. A.-C., Brown, E. J., Henriksen, O., Mildenerberger, T., Galparsoro, I., Clausen, N.-E., & de Deurs, M. (2025). Case-dependent impacts of offshore wind farms on ecosystems: A systematic review and meta-analysis. *Ocean & Coastal Management*, 270, 107853. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2025.107853>
- Thompson, P. M., Graham, I. M., Cheney, B., Barton, T. R., Farcas, A., & Merchant, N. D. (2020). Balancing risks of injury and disturbance to marine mammals when pile driving at offshore wind farms. *Ecological Solutions and Evidence*, 1(2), e12034. <https://doi.org/10.1002/2688-8319.12034>
- Tougaard, J., Carstensen, J., Teilmann, J., Skov, H., & Rasmussen, P. (2009). Pile driving zone of responsiveness extends beyond 20 km for harbor porpoises *Phocoena phocoena* (L.). *The Journal of the Acoustical Society of America*, 126(1), 11–14. <https://doi.org/10.1121/1.3132523>
- Tougaard, J., Henriksen, O. D., & Miller, L. A. (2009). Underwater noise from three types of offshore wind turbines: Estimation of impact zones for harbor porpoises and harbor seals. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 125(6), 3766–3773. <https://doi.org/10.1121/1.3117444>
- Trifonova, N., Scott, B. E., Watson, S. C. L., Szostek, C., Declerck, M., & Beaumont, N. (2025). Fishing, offshore wind energy, climate change and marine spatial planning: Is it possible to plan for a best use of space? *Ecological Solutions and Evidence*, 6(2), e70039. <https://doi.org/10.1002/2688-8319.70039>
- Vaher, A., Kotta, J., Szava-Kovats, R., Kaasik, A., Fetissov, M., Aps, R., & Koivupuu, A. (2022). Assessing cumulative impacts of human-induced pressures on reef and sandbank habitats and associated biotopes in the northeastern Baltic Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 183, 114042. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114042>
- van Bemmelen, R., Leemans, J., Collier, M., Green, R., Middelveld, R., Thaxter, C., & Fijn, R. (2023). Avoidance of offshore wind farms by Sandwich terns increases with turbine density. *Ornithological Applications*, 125(4), duad055. <https://doi.org/10.1093/ornithapp/duad055>
- Vandendriessche, S., Derweduwen, J., & Hostens, K. (2015). Equivocal effects of offshore wind farms in Belgium on soft substrate epibenthos and fish assemblages. *Hydrobiologia*, 756(1), 19–35. <https://doi.org/10.1007/s10750-014-1997-z>
- Vanhellemont, Q., & Ruddick, K. (2014). Turbid wakes associated with offshore wind turbines observed with Landsat 8. *Remote Sensing of Environment*, 145, 105–115. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.01.009>
- Vodopivec, M., Peliz, A. J., & Malej, A. (2017). Offshore marine constructions as propagators of moon jellyfish dispersal. *Environmental Research Letters*, 12(8), 084016. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa75d9>
- Voet, H., Soetaert, K., Moens, T., Bodt, S. de, Boeckx, P., Colen, C., & Vanaverbeke, J. (2023). N₂O production by mussels: Quantifying rates and pathways in current and future climate settings. *Frontiers in Marine Science*, 10, 1101469. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1101469>
- von der Au, M., Karbach, H., Bell, A., Bauer, O., Karst, U., & Meermann, B. (2012). Determination of metal uptake in single organisms, *Corophium volutator*, via complementary electrothermal vaporization/inductively coupled plasma mass spectrometry and laser ablation/inductively coupled plasma mass spectrometry. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 26(20), 2401–2409. <https://doi.org/10.1002/rcm.8953>
- Voß, J., Rose, A., Kosarev, V., Vilela, R., van Opzeeland, I. C., & Diederichs, A. (2023). Response of harbor porpoises (*Phocoena phocoena*) to different types of acoustic harassment devices and subsequent piling during the construction of offshore wind farms. *Frontiers in Marine Science*, 10, 1128322. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1128322>
- Wang, J. J., Zou, X. Q., Yu, W. W., Zhang, D. J., & Wang, T. (2019). Effects of established offshore wind farms on energy flow of coastal ecosystems: A case study of the Rudong offshore wind farms in China. *Ocean & Coastal Management*, 171, 111–118. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.01.016>
- Wang, J., Zhang, Y. M., Xu, M., & Liu, B. Q. (2019). Heavy metal pollution of surface sediments in the northern waters of the abandoned Yellow River Delta in Jiangsu Province, China, and ecological risk assessment. *Applied Ecology and Environmental Research*, 17(6), 14867–14882. https://doi.org/10.15666/aeer/1706_1486714882
- Wang, T., Gao, Z. M., Ru, X. S., Wang, X., Yang, B., & Zhang, L. B. (2023). Metabolomics for in situ monitoring of attached *Crassostrea gigas* and *Mytilus edulis*: Effects of offshore wind farms on aquatic organisms. *Marine Environmental Research*, 187, 105944. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2023.105944>

- Wang, T., Ru, X. S., Deng, B. N., Zhang, C. X., Wang, X., Yang, B., & Zhang, L. B. (2023). Evidence that offshore wind farms might affect marine sediment quality and microbial communities. *Science of the Total Environment*, 856, 158782. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158782>
- Warwick-Evans, V., Atkinson, P. W., Walkington, I., & Green, J. A. (2018). Predicting the impacts of wind farms on seabirds: An individual-based model. *Journal of Applied Ecology*, 55(2), 503–515. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12996>
- Watson, S. C. L., Somerfield, P. J., Lemasson, A. J., Knights, A. M., Edwards-Jones, A., Nunes, J., Pascoe, C., McNeill, C. L., Schratzberger, M., Thompson, M. S. A., Couce, E., Szostek, C. L., Baxter, H., & Beaumont, N. J. (2024). The global impact of offshore wind farms on ecosystem services. *Ocean & Coastal Management*, 249, 107023. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2024.107023>
- Watson, S. C. L., Szostek, C. L., Edwards-Jones, A., Wills, B., Watson, G. J., & Beaumont, N. J. (2025). Assessing, monitoring and mitigating the effects of offshore wind farms on biodiversity. *Nature Reviews Biodiversity*, 1(9), 581–596. <https://doi.org/10.1038/s44358-025-00074-5>
- Wawrzynkowski, P. (2025). *Ecological impacts of floating offshore wind development in the Mediterranean in the context of climate and biodiversity crisis* [Doctoral dissertation, University of Barcelona].
- Wawrzynkowski, P., Sabatés, A., & Lloret, J. (2026). Balancing wind energy expansion and fisheries in the Mediterranean Sea: A trait-based assessment of vulnerability to floating offshore wind farms for commercially important species. *Marine Environmental Research*, 214, 107770. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2025.107770>
- Werner, K. M., Haslob, H., Reichel, A. F., Gimpel, A., & Stelzenmüller, V. (2024). Offshore wind farm foundations as artificial reefs: The devil is in the detail. *Fisheries Research*, 272, 106937. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2024.106937>
- Westerberg, H., & Lagenfelt, I. (2008). Sub-sea power cables and the migration behaviour of the European eel. *Fisheries Management and Ecology*, 15(5–6), 369–375. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2400.2008.00630.x>
- Whyte, K. F., Russell, D. J. F., Sparling, C. E., Binnerts, B., & Hastie, G. D. (2020). Estimating the effects of pile driving sounds on seals: Pitfalls and possibilities. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 147(6), 3948–3958. <https://doi.org/10.1121/10.0001408>
- Wilber, D. H., Brown, L., Griffin, M., DeCelles, G. R., & Carey, D. A. (2022). Offshore wind farm effects on flounder and gadid dietary habits and condition on the northeastern US coast. *Marine Ecology Progress Series*, 683, 123–138. <https://doi.org/10.3354/meps13957>
- Wilhelmsson, D., Malm, T., & Öhman, M. C. (2006). The influence of offshore wind power on demersal fish. *ICES Journal of Marine Science*, 63(5), 775–784. <https://doi.org/10.1016/j.icesjms.2006.02.001>
- Williams, J. P., Jaco, E. M., Scholz, Z., Williams, C. M., Pondella, D. J., Rasser, M. K., & Schröder, D. M. (2023). Red rock crab (*Cancer productus*) movement is not influenced by electromagnetic fields produced by a submarine power transmission cable. *Continental Shelf Research*, 269, 105145. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2023.105145>
- Wyman, M. T., Klimley, A. P., Battleson, R. D., Agosta, T. V., Chapman, E. D., Haverkamp, P. J., Pagel, M. D., & Kavet, R. (2018). Behavioral responses by migrating juvenile salmonids to a subsea high-voltage DC power cable. *Marine Biology*, 165(8), 134. <https://doi.org/10.1007/s00227-018-3385-0>
- Zonderman, A., Wippermann, D., Ebeling, A., Klein, O., Erbslöh, H.-B., Zimmermann, T., Hildebrandt, L., Hasenbein, S., Weinberg, I., Kirchgeorg, T., & Präfrock, D. (2025). Analyzing the metal body burden of turbine-colonizing mussels from North Sea offshore wind farms. *Marine Pollution Bulletin*, 218, 118216. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.118216>

COLLECTIF DE TRAVAIL

Pilotes scientifiques

Nathalie NIQUIL, CNRS. UMR 6143 Morphodynamique continentale et côtière (M2C)

Cédric BACHER, Ifremer. Dynamiques des écosystèmes côtiers (DYNECO)

Membres du collectif d'expert-es

Matthieu AUTHIER, La Rochelle Université. UAR 3462 Observatoire pour la conservation de la mégafaune marine (Pelagis)

Sakina-Dorothée AYATA, Sorbonne Université. UMR 7159 Laboratoire d'océanographie et du climat : expérimentations et approches numériques (LOCEAN)

Catherine BOEMARE, École des hautes études en sciences sociales (EHESS). UMR 8568 Centre international de recherche sur l'environnement et le développement (CIRED)

Arthur CAPET, Institute of Natural Sciences (RBINS). Ecosystem modelling group (ECOMOD)

Christelle CAPLAT, Université de Caen Normandie. UR 7482 Marine ecosystems and organisms research lab (MERSEA)

Antoine CARLIER, Ifremer. Dynamiques des écosystèmes côtiers (DYNECO)

Peter DAVIES, Ifremer. Laboratoire structures, matériaux avancés et sollicitations hyperbares (SMASH)

Steven DEGRAER, Institute of Natural Sciences (RBINS). Marine ecology and management (MARECO)

Sophie DE GRISSAC, Muséum national d'Histoire naturelle (MNHN). UMR 7204 Centre d'écologie et des sciences de la conservation (CESCO)

Pierre GERNEZ, Nantes Université. UR 2160 Institut des substances et organismes de la mer (ISOMer)

Sean HEIGHTON, CNRS. Chercheur postdoctoral à la Mission pour l'expertise scientifique (MPES)

Youenn JÉZÉQUEL, Université de Bretagne Occidentale. UMR 6539 Laboratoire des sciences de l'environnement marin (LEMAR)

Jean-Luc JUNG, Muséum national d'Histoire naturelle (MNHN). UMR 7205 Institut de systématique, évolution, biodiversité (ISYEB)

Christian KERBIRIOU, Sorbonne Université. UMR 7204 Centre d'écologie et des sciences de la conservation (CESCO)

Raphaël LAMI, Sorbonne Université. UMR 8176 Laboratoire de biodiversité et biotechnologies microbiennes (LBBM)

Philippe LENFANT, Université de Perpignan Via Domitia. UMR 5110 Centre de formation et de recherche sur les environnements méditerranéens (CEFREM)

Sylvain PIOCH, Université Paul-Valéry Montpellier 3. Laboratoire de géographie et d'aménagement de Montpellier (LAGAM)

Aurore RAOUX, Université de Caen Normandie. UMR 6143 Morphodynamique continentale et côtière (M2C)

Alexei SENTCHEV, Université du Littoral Côte d'Opale. UMR 8187 Laboratoire d'océanologie et de géosciences (LOG)

Laure SIMPLET, Ifremer. UMR 6538 Geo-Ocean

Pierre THIRIET, Office français de la biodiversité (OFB). UAR 2006 Centre d'expertise et de données sur le patrimoine naturel (PatriNat)

Frédérique VIARD, CNRS. UMR 5554 Institut des sciences de l'évolution de Montpellier (ISEM)

Camille VOGEL, Ifremer. Laboratoire ressources halieutiques de Port-en-Bessin (LRHPB)

Cheffe de projet

Eugénie CAZAUX, Ifremer. Coordination de l'expertise en Appui aux politiques publiques (APP)

Équipe projet

Jérémy BARRAULT, Graphiste indépendant – **Isabelle CLAUSS**, CNRS. Information scientifique et technique (INIST) – **Axelle MONAT**, Ifremer. Chargée de communication événementielle – **Megan QUIMBRE**, Ifremer. Information scientifique et technique (IST) – **Patricia Mahafaka RANOARISOA**, CNRS. Information scientifique et technique (INIST).

Étudiant·es et élèves-ingénieur·es ayant contribué à l'ESCO dans le cadre d'un stage

Romane BOILEAU, AgroParisTech, cursus ingénieur, 2ème année. Revue systématique de la littérature sur l'identification de mesures d'atténuation des effets des parcs éoliens offshore sur la biodiversité marine – **Othmane EL AKRABA**, IMT Atlantique, cursus ingénieur, 3ème année. Développement d'un outil de visualisation dynamique et interactive des résultats d'une revue systématique de la littérature – **Alice GUÉNOT**, École normale supérieure de Lyon, département Biologie, 4ème année. Cumul d'impacts, incertitudes, hiérarchisation des impacts et transposabilité : synthèse des méthodes employées pour la méta-analyse des données de pressions autour de l'éolien en mer – **Gaëtan PEYGOURDI**, Sorbonne Université – Sciences Po Paris, double master Sciences et politiques de l'environnement, 1ère année. Outils d'automatisation visant à accélérer les revues systématiques de la littérature et les méta-analyses : une étude de cas.

Chercheur·ses et expert·es ayant contribué aux réflexions scientifiques de l'ESCO

Jonathan BONFANTI, Université Paul-Valéry Montpellier 3. UMR 5175 Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive (CEFE) – **Anik BRIND'AMOUR**, Ifremer. UMR 0985 Dynamique et durabilité des écosystèmes : de la source à l'océan (DECOD) – **David CHAVALARIAS**, CNRS. Institut des systèmes complexes de Paris Île-de-France (ISC-PIF) – **Nils FERRAND**, Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE). UMR 1458 Gestion de l'eau, acteurs, usages (G-EAU) – **Éric GUILYARDI**, CNRS. UMR 7159 Laboratoire d'océanographie et du climat : expérimentations et approches numériques (LOCEAN) – **Philippe HUNEMAN**, CNRS. Institut d'histoire et de philosophie des sciences et des techniques (IHPST) – **Joseph LANGRIDGE**, Fondation pour la recherche sur la biodiversité (FRB) – **Marie LA RIVIÈRE**, Office français de la biodiversité (OFB). UAR 2006 Centre d'expertise et de données sur le patrimoine naturel (PatriNat) – **Gonéri LE COZANNET**, Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) – **Laëtitia MIQUEROL**, Office français de la biodiversité (OFB) – **Yves MEINARD**, CNRS. UMR 7304 Centre Gilles-Gaston Granger (CGGG) – **Lény PATINAUX**, Université de Limoges. UMR 6042 Laboratoire de géographie physique et environnementale (GEOLAB) – **Benoît PLANCOULAIN**, Université de Caen Normandie. UMRS 1086 Unité de recherche interdisciplinaire pour la prévention et le traitement des cancers (ANTICIPE) – **Frédéric QUEMMERAI-AMICE**, Office français de la biodiversité (OFB) – **Pierre SCEMAMA**, Ifremer. UMR 6308 Laboratoire Aménagement des usages des ressources et des espaces marins et littoraux (AMURE) – **Anne-Laure THOMAS-DEREPAS**, CNRS. Institut des systèmes complexes de Paris Île-de-France (ISC-PIF) – **Alexis TSOUKIÀS**, CNRS. UMR 7243 Laboratoire d'analyse et de modélisation de systèmes pour l'aide à la décision (LAMSAD) – **Clara ULRICH**, Ifremer. Département Ressources biologiques et environnement (RBE).

Comité de suivi

Chantal COMPÈRE, Ifremer. Directrice scientifique – **Marion CUIF**, Ifremer. Coordinatrice énergies marines renouvelables – **Guillaume DECOCQ**, CNRS. Directeur adjoint scientifique – **Philippe GOULLETQUER**, Ifremer. Directeur scientifique adjoint – **Florence LAFAY-DUFOUR**, CNRS. Responsable de la conduite des expertises – **Valérie LALLEMAND-BREITENBACH**, CNRS. Directrice de la Mission pour l'expertise scientifique (MPES) – **Olivier LE PIVERT**, Ifremer. Délégué à la coordination de l'expertise en Appui aux politiques publiques (APP) – **Gilles PINAY**, CNRS. Directeur adjoint scientifique – **Emmanuel PONZEVEA**, Ifremer. Directeur scientifique adjoint – **Wilfried SANCHEZ**, Ifremer. Directeur scientifique adjoint – **Aude VÉDRINES**, CNRS. Responsable de la conduite des expertises.

Comité de suivi commanditaires

Tobias BOSSMANN, Ministère de l'Économie, des Finances et de la Souveraineté industrielle, énergétique et numérique. Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC) – **Marie-Pierre CABOS**, Ministère de la Transition écologique, de la Biodiversité et des Négociations internationales sur le climat et la nature. Direction générale de l'aménagement, du logement et de la nature (DREAL), Direction de l'eau et de la biodiversité (DEB) – **Lise DEGOY**, Ministère de l'Économie, des Finances et de la Souveraineté industrielle, énergétique et numérique. Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC) – **Léna DESPRINGHERE**, Ministère de l'Économie, des Finances et de la Souveraineté industrielle, énergétique et numérique. Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC) – **Hermine DURAND**, Ministère de l'Économie, des Finances et de la Souveraineté industrielle, énergétique et numérique. Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC) – **Olivier DUFOURNEAU**, Ministère de la Transition écologique, de la Biodiversité et des Négociations internationales sur le climat et la nature. Direction générale des affaires maritimes, de la pêche et de l'aquaculture (DGAMPA) – **Dounia KHALLOUKI**, Ministère de la Transition écologique, de la Biodiversité et des Négociations internationales sur le climat et la nature. Direction générale des affaires maritimes, de la pêche et de l'aquaculture (DGAMPA) – **Mehdi KHNISSI**, Ministère de la Transition écologique, de la Biodiversité et des Négociations internationales sur le climat et la nature. Direction générale des affaires maritimes, de la pêche et de l'aquaculture (DGAMPA) – **Sylène LASFARGUES**, Ministère de la Transition écologique, de la Biodiversité et des Négociations internationales sur le climat et la nature. Direction générale de l'aménagement, du logement

et de la nature (DGALN), Direction de l'eau et de la biodiversité (DEB) – **Marie MAHIN**, Ministère de la Transition écologique, de la Biodiversité et des Négociations internationales sur le climat et la nature. Direction générale de l'aménagement, du logement et de la nature (DGALN), Direction de l'eau et de la biodiversité (DEB) – **Xavier MARILL**, Ministère de la Transition écologique, de la Biodiversité et des Négociations internationales sur le climat et la nature. Direction générale des affaires maritimes, de la pêche et de l'aquaculture (DGAMPA) – **Ilinca MATHIEU**, Ministère de la Transition écologique, de la Biodiversité et des Négociations internationales sur le climat et la nature. Direction générale de l'aménagement, du logement et de la nature (DGALN), Direction de l'eau et de la biodiversité (DEB) – **Étienne PERROT**, Ministère de l'Économie, des Finances et de la Souveraineté industrielle, énergétique et numérique. Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC) – **Martin SALMON**, Ministère de l'Économie, des Finances et de la Souveraineté industrielle, énergétique et numérique. Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC) – **Nora SUSBIELLE**, Ministère de la Transition écologique, de la Biodiversité et des Négociations internationales sur le climat et la nature. Direction générale de l'aménagement, du logement et de la nature (DGALN), Direction de l'eau et de la biodiversité (DEB) – **Vincent SZLEPER**, Ministère de la Transition écologique, de la Biodiversité et des Négociations internationales sur le climat et la nature. Direction générale de l'aménagement, du logement et de la nature (DGALN), Direction de l'eau et de la biodiversité (DEB).

Comité consultatif d'acteurs

Alain BLANCHARD, Association nationale des élus des littoraux (ANEL) – **Paul BONFILS**, Comité français de l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN France) – **Gauthier CARLE**, Plateforme Océan & Climat (POC) – **Gro DE SAINT MARTIN**, Réseau de transport d'électricité (RTE) – **Robin DIXON**, France Renouvelables – **Thomas EGLIN**, Agence de la transition écologique (ADEME) – **Amandine EYNAUDI**, Office français de la biodiversité (OFB) – **Théotime FILY**, Comité national des pêches maritimes et des élevages marins (CNPMM) – **Pierre-André FARQUE**, Ligue pour la protection des oiseaux (LPO) – **Julie FRAIX**, Syndicat des énergies renouvelables (SER) – **Françoise GAILL**, Plateforme Océan & Climat (POC) – **Thomas GUYOT**, Association nationale des élus des littoraux (ANEL) – **Jonathan HESS**, Ministère de la Transition écologique, de la Biodiversité et des Négociations internationales sur le climat et la nature. Commissariat général au développement durable (CGDD) – **Armelle JUNG**, France Nature Environnement (FNE) – **Marion KRAAIJENBRINK**, France Renouvelables – **Sarah LELONG**, RespectOcean – **Pierre LEONIDAS**, Cluster Maritime Français (CMF) – **Stéphanie LEMESLE**, Agence de l'eau Seine-Normandie (AESN) – **Barbara LEROY**, Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema) – **David MAGNIER**, CDC Biodiversité – **Frédérique MILLARD**, Ministère de la Transition écologique, de la Biodiversité et des Négociations internationales sur le climat et la nature. Commissariat général au développement durable (CGDD) – **Emma POZNANSKI**, Armateurs de France – **Jehanne PRÉVOT**, France Énergies Marines (FEM) – **Thibault PRÉVOST**, Ministère de la Transition écologique, de la Biodiversité et des Négociations internationales sur le climat et la nature. Commissariat général au développement durable (CGDD) – **Manuel SARRAZA**, Agence de l'eau Seine-Normandie (AESN) – **Jean-François SYS**, Comité français de l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN France) – **Marie YVER**, Réseau de transport d'électricité (RTE).

Ce document est la synthèse du rapport d'expertise dont les auteur·rices sont les membres du collectif d'expert·es. Les auteur·rices remercient les contributeur·rices sollicité·es ponctuellement dans le cadre des travaux de l'expertise, notamment pour les réflexions méthodologiques et scientifiques, ainsi que les étudiant·es et élèves-ingénieur·es ayant contribué à l'ESCO dans le cadre de stages. Ils et elles remercient également les membres des instances de suivi et de consultation mobilisées tout au long de l'expertise.

Nathalie Niquil (coord.), Cédric Bacher (coord.), Sean Heighton (coord.), Eugénie Cazaux (coord.), Matthieu Authier, Sakina-Dorothée Ayata, Catherine Boemare, Arthur Capet, Christelle Caplat, Antoine Carlier, Peter Davies, Steven Degraer, Sophie De Grissac, Pierre Gernez, Youenn Jézéquel, Jean-Luc Jung, Christian Kerbiriou, Raphaël Lami, Philippe Lenfant, Sylvain Pioch, Aurore Raoux, Alexei Sentchev, Laure Simplet, Pierre Thiriet, Frédérique Viard, Camille Vogel (2026). *Éoliennes en mer & biodiversité. Rapport de l'expertise scientifique collective*. Ifremer – CNRS (France).

Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer

1625 route de Sainte-Anne - CS 10070
29280 Plouzané
Tél. +33 (0)2 98 22 40 40

Rejoignez-nous sur



www.ifremer.fr

Centre national de la recherche scientifique

Mission Pour l'Expertise Scientifique - MPES
3 rue Michel Ange
75794 Paris Cedex 16
Tél. +33 (0)1 44 96 40 00

Rejoignez-nous sur



www.cnrs.fr

