

Éoliennes en mer & biodiversité

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



— RÉSUMÉ —

Principaux messages à retenir

L'expertise scientifique collective *Éoliennes en mer & biodiversité* constitue à ce jour la synthèse scientifique la plus complète consacrée aux effets des parcs éoliens en mer et de leurs raccordements sur la biodiversité marine. Fondée sur une revue systématique de la littérature scientifique internationale, elle met en évidence des effets bien documentés pour certaines combinaisons entre pressions exercées par les éoliennes et groupes biologiques — notamment l'effet obstacle chez les oiseaux, l'effet du bruit chez les mammifères marins et l'effet récif chez les organismes des fonds marins — tout en soulignant l'ampleur des incertitudes persistantes. À l'inverse, les effets associés à d'autres pressions demeurent peu documentés, ce qui ne permet pas, à ce stade, de disposer d'une évaluation intégrée des effets des parcs éoliens en mer.

Les résultats analysés montrent que les effets observés varient fortement selon les espèces considérées, les contextes environnementaux, les technologies utilisées et les phases de développement des parcs. Les connaissances disponibles concernent principalement des réponses observées à des échelles locales ou individuelles, tandis que les conséquences à long terme sur les populations, les réseaux trophiques et le fonctionnement global des écosystèmes sont peu caractérisées.

L'analyse dresse également un panorama des mesures étudiées dans la littérature scientifique pour atténuer les effets des parcs éoliens en mer sur la biodiversité marine. Ces mesures s'inscrivent dans la séquence réglementaire Éviter – Réduire – Compenser. Les mesures recensées dans les publications concernent un nombre restreint de combinaisons pression–groupe biologique et, pour une large part, n'ont pas encore fait l'objet de tests en conditions réelles.

L'expertise souligne également que la majorité des connaissances actuellement disponibles provient de parcs éoliens posés situés en mer du Nord, principalement sur des fonds meubles. Aussi, les résultats doivent être extrapolés avec prudence dans d'autres contextes écologiques et technologiques, notamment pour les façades françaises méditerranéennes et les futurs parcs flottants.

À partir de l'approche globale des différentes pressions exercées par les parcs éoliens en mer et de leurs effets sur la biodiversité marine développée dans le cadre de l'expertise, l'analyse des travaux scientifiques disponibles suggère que, dans l'hypothèse d'un déploiement massif et de long terme de l'éolien en mer, des transformations durables de la biodiversité marine sont vraisemblables. Les pressions exercées par les parcs éoliens sont susceptibles d'interagir entre elles, mais également avec d'autres pressions anthropiques déjà présentes dans les espaces marins, sans que les effets cumulés de ces interactions puissent aujourd'hui être évalués de manière robuste.

L'expertise met ainsi en évidence plusieurs besoins prioritaires pour renforcer les connaissances scientifiques disponibles: développer des suivis à long terme et multi-sites, mieux caractériser les effets cumulés et les dynamiques à grande échelle, élargir les recherches aux groupes biologiques encore peu étudiés, harmoniser les protocoles et les indicateurs de suivi, tester et évaluer scientifiquement l'efficacité des mesures d'atténuation, faciliter l'accès aux parcs et aux données issues des suivis environnementaux réalisés par les opérateurs.

Éclairer la décision et le débat publics par la science

L'expertise scientifique collective *Éoliennes en mer & biodiversité* a pour objectif de synthétiser, analyser et rendre accessibles les connaissances scientifiques disponibles sur les effets de l'éolien en mer sur la biodiversité marine. Réalisée en toute indépendance, elle vise à éclairer la décision publique, le débat public et l'ensemble des citoyens sur ces enjeux, sans se substituer aux choix collectifs et aux arbitrages sociétaux auxquels ces enjeux renvoient.

Cette expertise scientifique collective a été réalisée avec le soutien financier du Ministère de l'Économie, des Finances et de la Souveraineté industrielle, énergétique et numérique.

Expertise scientifique collective

Éoliennes en mer & biodiversité

Les parcs éoliens en mer occupent une place croissante dans les stratégies de décarbonation des systèmes énergétiques et dans la capacité des États à assurer leur souveraineté. Dans un contexte de changement climatique, et alors que le GIEC souligne la nécessité de réduire la dépendance aux énergies fossiles, le développement des énergies marines renouvelables constitue l'un des leviers mobilisés par la France et l'Europe pour atteindre les objectifs de neutralité carbone définis dans le cadre de l'Accord de Paris (2015) et accompagner la diversification du mix énergétique. Cette dynamique se traduit par un essor rapide des projets éoliens dans des environnements marins variés, depuis les façades Manche-mer du Nord et Atlantique jusqu'à la Méditerranée, avec des technologies d'éoliennes posées et flottantes.

Comme tout usage industriel en mer, ce déploiement s'inscrit toutefois dans des écosystèmes marins et côtiers déjà soumis à de multiples pressions anthropiques, dans un contexte plus large d'érosion de la biodiversité. L'IPBES souligne, dans son évaluation mondiale publiée en 2019, que les changements d'usage de la mer figurent parmi les principales pressions directes exercées sur la biodiversité marine. Les infrastructures éoliennes viennent ainsi s'ajouter à d'autres activités humaines et structures artificielles modifiant le fonctionnement des écosystèmes marins.

Les effets des parcs éoliens en mer sur la biodiversité marine font aujourd'hui l'objet d'un nombre croissant de publications scientifiques, en particulier dans les pays d'Europe du Nord où l'éolien en mer est déployé depuis plusieurs décennies.

Que nous dit la littérature scientifique existante sur la manière dont l'éolien en mer modifie la biodiversité marine et le fonctionnement des écosystèmes marins et côtiers ? Que nous apprend-elle sur les conséquences à court, moyen et long termes de ces modifications ? Quelles sont les connaissances disponibles sur les mesures d'atténuation ?

C'est à ces interrogations que l'Expertise scientifique collective (ESCo) *Éoliennes en mer & biodiversité*, conduite conjointement par l'Ifremer et le CNRS sur saisine des ministères chargés de l'énergie, de la transition écologique et de la mer, apporte un éclairage scientifique. 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.

Réalisée entre janvier 2024 et juin 2026 par un collectif de 25 chercheur·ses issu·es de 13 établissements de recherche publique, l'ESCo repose sur un état des lieux critique des connaissances scientifiques internationales disponibles relatives aux effets des parcs éoliens en mer et de leurs infrastructures de raccordement sur la biodiversité marine et les socio-écosystèmes marins et côtiers. Le terme de socio-écosystème suppose de considérer conjointement les écosystèmes marins, les activités humaines qui y sont associées et les interactions entre ces différentes composantes, 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.

Mesurer les effets propres aux parcs éoliens en mer et les distinguer de ceux résultant d'autres pressions exercées sur les milieux marins par les différentes activités humaines, en mer comme à terre, constitue un exercice complexe. L'expertise s'est attachée à identifier et analyser les effets des pressions générées spécifiquement par l'éolien en mer sur la biodiversité, tels qu'ils sont documentés dans la littérature scientifique. Son objet est d'éclairer l'état des connaissances relatives à ces pressions et à leurs effets, et non d'établir une hiérarchie ou une comparaison entre les différentes pressions anthropiques qui s'exercent sur les écosystèmes marins.

Dans ce cadre, l'expertise analyse, en particulier, les acquis de la recherche, les incertitudes et controverses, les principales lacunes de connaissances, les mesures d'atténuation des effets ainsi que les conditions de transposabilité des résultats aux eaux hexagonales. Elle comprend plusieurs livrables complémentaires : un rapport scientifique détaillé, une synthèse destinée aux décideur·ses et aux acteurs concerné·es, le présent résumé, ainsi qu'un colloque public de restitution.

Sur quelles connaissances scientifiques repose l'expertise?

L'ESCO repose sur une revue systématique de la littérature scientifique internationale. Cette méthode vise à rassembler, sélectionner et analyser les publications selon un protocole rigoureux, exhaustif, transparent et reproductible, destiné à limiter les biais d'analyse.

Plus de 4 500 publications scientifiques ont été préalablement identifiées lors de la recherche bibliographique. Les références pertinentes permettant de répondre à la saisine, c'est-à-dire celles portant sur les effets de l'éolien en mer sur la biodiversité, ont ensuite été sélectionnées parmi ce corpus initial. À l'issue de ce processus, 411 articles ont été retenus et analysés dans le cadre de cette revue systématique.

L'expertise adopte une approche par pressions. Une pression désigne ici un mécanisme par lequel un parc éolien modifie le milieu marin au-delà de sa variabilité naturelle. Dix pressions ont ainsi été analysées (Figure). Elles peuvent s'exercer différemment selon les phases du développement d'un parc : prospection, construction, exploitation/maintenance et démantèlement.

Les effets observés résultent ainsi de l'interaction entre une pression et les organismes vivants susceptibles d'y être exposés (oiseaux, poissons, mammifères marins, etc.), ainsi qu'avec certaines composantes physiques du milieu marin — habitats, sédiments, ou courants — dès lors qu'elles jouent un rôle dans le fonctionnement des écosystèmes. Cette approche permet de comparer des résultats issus de contextes environnementaux et technologiques variés, tout en identifiant des leviers d'atténuation mobilisables par les acteurs.

Pour décrire les effets observés, l'analyse s'appuie également sur le cadre des Variables Essentielles de la Biodiversité (EBV), c'est-à-dire des variables mesurables permettant de suivre l'état et l'évolution de la biodiversité (distribution et abondance, reproduction, mortalité, comportement, régime alimentaire, etc.), afin de caractériser les réponses à différents niveaux d'organisation biologique, depuis l'individu jusqu'à l'écosystème et au paysage marin (plusieurs écosystèmes interconnectés).

Il a enfin été choisi de privilégier le terme d'« effet » à celui d'« impact », sans qualifier les effets observés de « positifs » ou de « négatifs ». Un même effet peut être interprété différemment selon le contexte, le niveau d'organisation biologique considéré ou les parties prenantes concernées. L'expertise décrit ainsi les effets observés, leurs conditions d'apparition et les incertitudes associées, dans une perspective analytique et scientifiquement neutre.

Aujourd'hui, quels sont les effets les mieux documentés?

Les éoliennes constituent-elles un obstacle au déplacement des espèces?

En tant que structures physiques émergées et immergées, les éoliennes en mer peuvent constituer un obstacle au déplacement de certaines espèces mobiles. Cette pression concerne principalement la faune volante — oiseaux marins, oiseaux terrestres migrateurs et chauves-souris — mais pourrait aussi affecter certains organismes marins mobiles, par des phénomènes de dérangement ou de modification des trajectoires. Deux grands types d'effets sont documentés.

Le premier est l'effet barrière : certaines espèces modifient leurs trajectoires pour éviter les parcs, ce qui peut allonger leurs déplacements ou réduire l'accès à certaines zones d'alimentation ou de repos. Cet effet est particulièrement documenté chez les oiseaux marins. Il varie selon les espèces : les plongeurs, les alcidés ou le fou de Bassan tendent plutôt à éviter les parcs, tandis que certains goélands peuvent, au contraire, être attirés par les structures, qu'ils utilisent comme zones de repos ou d'alimentation.

Le second effet concerne le risque de collision avec les pales, principalement évalué par modélisation. Les espèces les plus exposées sont celles qui volent régulièrement à hauteur de rotor, notamment de nuit, ou qui pénètrent fréquemment dans les parcs pour s'y nourrir, comme certains goélands. Chez les oiseaux migrateurs terrestres, des passages à hauteur de rotor ont également été documentés, notamment lors d'importantes migrations nocturnes en mer du Nord chez certains passereaux migrateurs.

Les connaissances restent plus limitées pour les chauves-souris, malgré la présence avérée en mer de certaines espèces migratrices, comme les noctules ou la pipistrelle de Nathusius.

Les effets observés dépendent enfin de nombreux paramètres : espèces concernées, saison, conditions météorologiques, distance à la côte, hauteur des rotors, densité et disposition des turbines. Les effets d'obstacle sous-marins demeurent, quant à eux, très peu documentés.

Les structures éoliennes favorisent-elles l'installation de nouveaux organismes?

L'installation d'éoliennes en mer introduit des structures artificielles immergées — fondations, enrochements et autres surfaces dures — dans des zones majoritairement dominées par des fonds meubles. Ces structures créent de nouveaux habitats susceptibles d'être colonisés par de nombreuses espèces. Ce phénomène, appelé « effet récif », constitue aujourd'hui l'un des effets les mieux documentés des parcs éoliens en mer.

L'effet récif concerne avant tout les organismes benthiques, c'est-à-dire les espèces vivant à proximité du fond marin ou dans les sédiments. Les structures sont souvent colonisées en forte densité par des moules, des amphipodes tubicoles du genre *Jassa* (petits crustacés vivant dans des tubes) ou encore des balanes (petits crustacés fixés). Dans certains

parcs de la mer du Nord, un seul mât d'éolienne peut ainsi héberger plusieurs tonnes de moules. Cette colonisation s'accompagne d'une augmentation locale importante de la biomasse — c'est-à-dire de la quantité de matière vivante présente — ainsi que d'une transformation de la composition des communautés biologiques.

Chez certains poissons, comme le tacaud ou le cabillaud, plusieurs études mettent également en évidence une augmentation locale de l'abondance, de la biomasse et parfois de la taille moyenne des individus à proximité des éoliennes. Certaines espèces modifient aussi leur régime alimentaire en consommant davantage de proies associées aux structures artificielles, comme les moules ou certains amphipodes. Ces changements peuvent se répercuter sur les réseaux trophiques, c'est-à-dire les relations alimentaires entre espèces, ainsi que sur certaines fonctions écologiques à l'échelle locale.

Les travaux disponibles suggèrent ainsi que l'effet récif pourrait, dans certains cas, contribuer à une production biologique locale au moins partielle (c'est-à-dire à une augmentation de la quantité de matière vivante produite), et pas uniquement à une concentration d'organismes déjà présents dans la zone. Toutefois, les effets sur le fonctionnement global des écosystèmes sont encore peu documentés.

Comment les habitats marins autour des éoliennes sont-ils modifiés?

Les parcs éoliens en mer modifient les habitats du fond marin (habitats benthiques) ainsi que certaines caractéristiques physiques de la colonne d'eau, c'est-à-dire l'ensemble des masses d'eau comprises entre la surface et le fond marin (habitats pélagiques). Ces modifications résultent à la fois des perturbations générées lors des phases de travaux et des effets associés à la présence des infrastructures dans le milieu marin en phase d'exploitation, les parcs ayant généralement une durée de vie comprise entre 25 et 35 ans.

Sur les fonds marins, les fondations et les dispositifs de protection contre l'affouillement — destinés à limiter l'érosion des sédiments au pied des structures — entraînent des modifications locales des habitats benthiques, notamment dans les zones à sédiments meubles. Les courants et la houle autour des structures peuvent provoquer des phénomènes de turbulence, de creusement des fonds, de remise en suspension des sédiments ou de modification de leur granulométrie (taille des particules). Ces changements s'accompagnent souvent d'une augmentation locale de la biomasse et de la diversité des communautés benthiques. En Belgique, certaines études ont par exemple mis en évidence, à proximité immédiate des turbines, une augmentation de la densité de la macrofaune benthique ainsi qu'une modification de la dominance de certaines espèces, avec une prédominance accrue du ver tubicole des sables *Lanice conchilega*. Les effets observés dépendent toutefois des contextes environnementaux, des phases de développement des parcs et des technologies utilisées, notamment de la nature des fonds marins, de la profondeur, des conditions hydrodynamiques ou du type de fondation. Ils demeurent généralement documentés à proximité immédiate des turbines, tandis que les effets à plus grande distance restent peu connus.

Dans la colonne d'eau, les éoliennes peuvent également modifier la turbulence, le mélange vertical des masses d'eau et leur

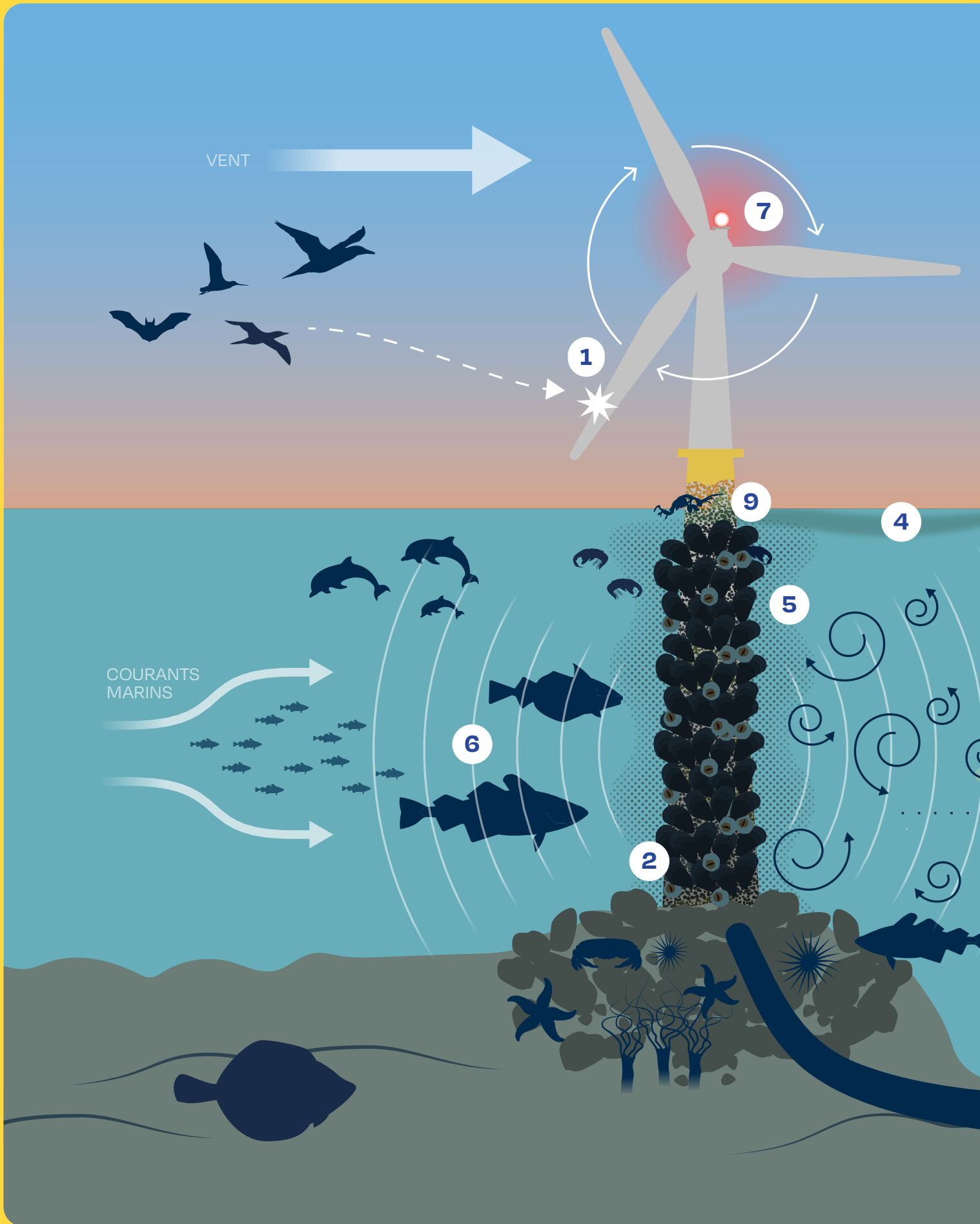
stratification, c'est-à-dire leur superposition en couches aux propriétés physiques distinctes. Ces modifications physiques sont susceptibles d'influencer localement la disponibilité des nutriments et les conditions de développement du plancton. En parallèle, les structures colonisées par des organismes filtreurs, notamment les moules, peuvent réduire localement les concentrations de phytoplancton et de zooplancton par des phénomènes de biofiltration. Les effets observés sur la production primaire, c'est-à-dire la production de matière organique par les organismes photosynthétiques constituant la base des réseaux trophiques, demeurent toutefois variables, voire contradictoires selon les contextes. Dans certaines situations, le mélange vertical pourrait favoriser les apports de nutriments et stimuler localement la croissance du phytoplancton; dans d'autres, les panaches turbides générés autour des structures — zones d'eau chargées de particules remises en suspension — pourraient au contraire limiter la photosynthèse et ainsi freiner son développement. Les conséquences écologiques de ces modifications sur le fonctionnement global des écosystèmes pélagiques restent peu documentées.

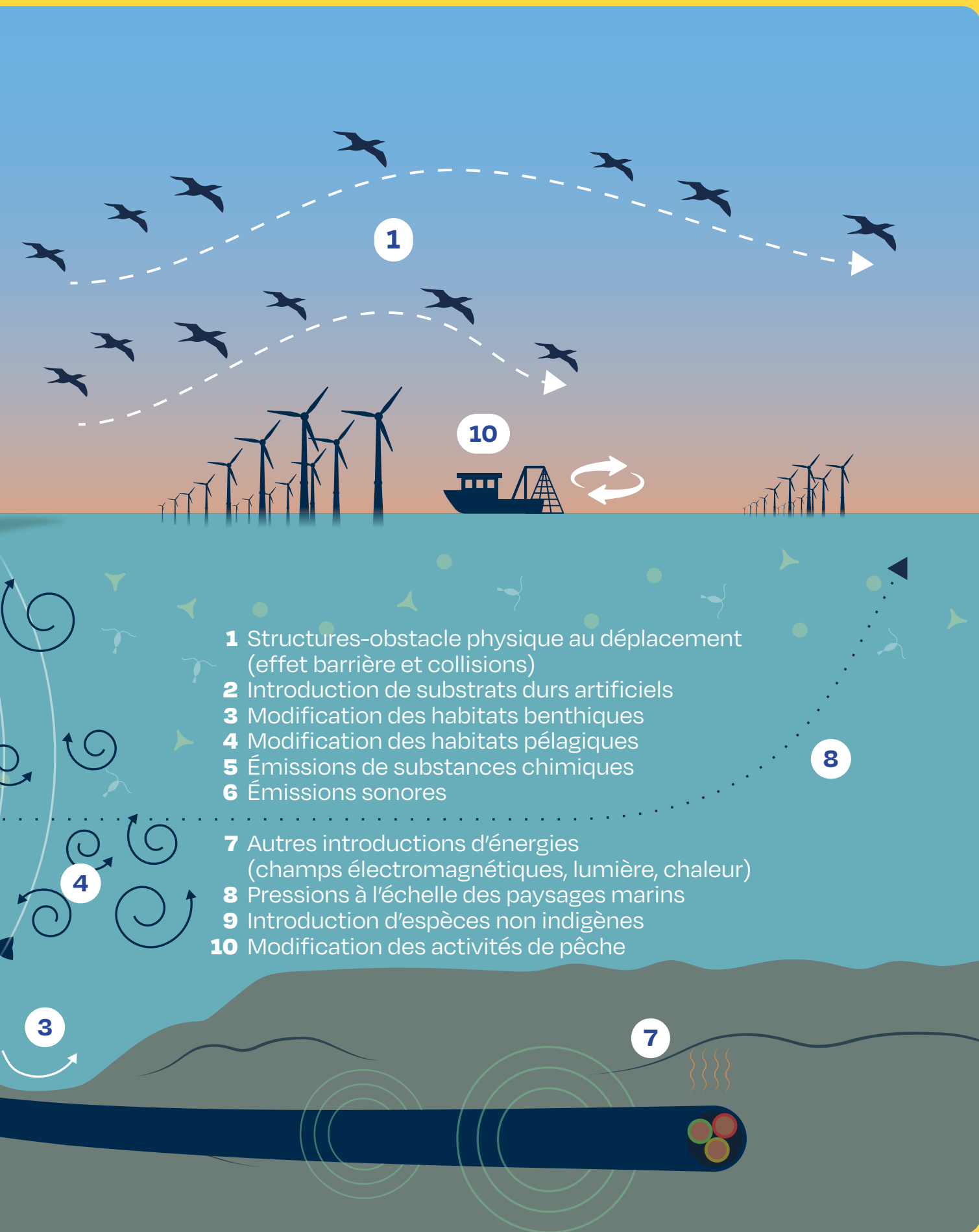
Que sait-on des émissions chimiques, sonores et d'autres formes d'énergie induites par les éoliennes en mer?

Le développement et l'exploitation des parcs éoliens en mer s'accompagnent de l'émission de substances chimiques, de sons sous-marins et d'autres formes d'énergie susceptibles d'affecter certaines composantes de la biodiversité marine. Les connaissances disponibles demeurent toutefois inégales selon les pressions étudiées.

Les émissions chimiques sont peu documentées. Elles proviennent principalement des systèmes de protection contre la corrosion des structures, notamment des anodes galvaniques, qui libèrent progressivement des éléments traces métalliques — comme l'aluminium, le zinc ou l'indium — et contribuent ainsi à augmenter localement les concentrations de ces métaux dans l'environnement marin, où ils peuvent être accumulés par certains organismes. D'autres sources potentielles incluent certains lubrifiants, les matériaux constitutifs des turbines ou encore la remise en suspension de sédiments lors des travaux, susceptibles d'entraîner le relargage de contaminants déjà présents dans les fonds marins. Les connaissances disponibles mettent principalement en évidence des réponses biologiques localisées. Des phénomènes de bioaccumulation de métaux chez certains organismes benthiques, ainsi que des modifications physiologiques chez des moules et des huîtres à proximité des infrastructures, ont notamment été rapportés. Les conséquences à l'échelle des populations ou des écosystèmes restent peu documentées.

Les émissions sonores constituent, à l'inverse, l'une des pressions les mieux étudiées, en particulier pendant la phase de construction. Les opérations de battage de pieux produisent des sons impulsifs de forte intensité susceptibles de se propager sur plusieurs dizaines de kilomètres. Les effets observés concernent principalement des modifications comportementales, des réactions de fuite, des changements de trajectoire ou des perturbations de certaines activités biologiques liées à l'utilisation du son (communication, alimentation, reproduction, etc.), notamment chez les mammifères marins, qui constituent le groupe biologique le plus étudié. Les connaissances disponibles reposent cependant





- 1** Structures-obstacle physique au déplacement (effet barrière et collisions)
- 2** Introduction de substrats durs artificiels
- 3** Modification des habitats benthiques
- 4** Modification des habitats pélagiques
- 5** Émissions de substances chimiques
- 6** Émissions sonores
- 7** Autres introductions d'énergies (champs électromagnétiques, lumière, chaleur)
- 8** Pressions à l'échelle des paysages marins
- 9** Introduction d'espèces non indigènes
- 10** Modification des activités de pêche

Les 10 pressions analysées dans l'ESCo *Éoliennes en mer & biodiversité*.

largement sur le marsouin commun, espèce particulièrement abondante en Atlantique Nord-Est et présentant des caractéristiques acoustiques spécifiques, de sorte que les résultats disponibles ne peuvent être que difficilement généralisés à l'ensemble des espèces de ce groupe. Chez cette espèce, des comportements d'évitement ont ainsi été observés à grande distance des zones de travaux. Des phénomènes de masquage acoustique — lorsque les sons produits par les activités humaines couvrent les sons utiles aux animaux — ainsi que des pertes auditives temporaires sont également rapportés, plus rarement des effets permanents. Chez les poissons, les études décrivent surtout des réponses individuelles, comme des réactions de stress ou des modifications temporaires du comportement. Les effets chroniques liés aux émissions sonores continues en phase d'exploitation des parcs, notamment associées aux opérations de maintenance et au trafic maritime nécessaire à ces interventions, sont peu documentés.

D'autres formes d'énergie sont également introduites dans le milieu marin, principalement sous la forme de champs électromagnétiques, de lumière artificielle et d'augmentations locales de température. Les champs électromagnétiques sont générés par les câbles électriques durant toute la phase d'exploitation des parcs. Ils peuvent être perçus par certaines espèces électro- ou magnéto-sensibles, c'est-à-dire capables de détecter des champs électriques ou magnétiques, notamment les requins, les raies ou certaines espèces migratrices. Les études disponibles concluent en majorité à une absence d'effet mesurable, mais quelques-unes mettent en évidence des modifications du comportement, de l'activité ou de la distribution spatiale, par exemple chez l'anguille européenne ou certaines raies. La lumière artificielle provient principalement des navires d'intervention, des mâts des éoliennes et des sous-stations électriques. Certaines couleurs ou longueurs d'onde semblent pouvoir attirer des oiseaux marins ou, indirectement, des chauves-souris via l'attraction des insectes, leurs proies. Enfin, si les effets potentiels de l'augmentation de la température liée au fonctionnement des câbles électriques ou de certains équipements sont peu documentés dans la littérature scientifique, cette augmentation reste localisée, généralement limitée à proximité immédiate des infrastructures.

À l'échelle des paysages marins, c'est-à-dire des ensembles d'habitats et d'écosystèmes interconnectés, les effets observés dépassent souvent la simple addition des effets locaux. La multiplication des parcs peut modifier la connectivité écologique entre habitats, notamment les possibilités de déplacement des organismes entre différentes zones, créer de nouveaux corridors de dispersion ou transformer les dynamiques de certaines populations. Des réponses contrastées sont observées selon les groupes biologiques : des augmentations d'abondance sont fréquemment rapportées chez certains poissons vivant à proximité du fond marin et chez certains macro-invertébrés, tandis que des diminutions sont davantage observées chez certaines espèces d'oiseaux marins ou de mammifères marins, comme le marsouin commun. Des modifications des aires de distribution et de certaines routes migratoires ont également été documentées chez plusieurs espèces d'oiseaux, notamment la sterne caugék.

Les structures artificielles favorisent également l'installation d'espèces non indigènes. Les fondations d'éoliennes constituent en effet de nouveaux supports de colonisation susceptibles d'être utilisés par ces espèces à différents stades de leur cycle de vie. Les zones intertidales artificielles (parties des fondations situées à l'interface entre l'air et la mer), alternativement recouvertes et découvertes par la marée, semblent particulièrement favorables à leur installation, notamment en raison d'une compétition plus faible avec les espèces indigènes. Plusieurs travaux suggèrent également que ces structures peuvent faciliter la dispersion de certaines espèces entre ports, zones côtières et espaces offshore, selon une dynamique dite de « pas japonais », dans laquelle des structures artificielles successives servent de relais de dispersion à certaines espèces non indigènes, comme cela a notamment été observé pour la caprelle japonaise ou le moucheron japonais. Toutefois, les conséquences écologiques à grande échelle sur les espèces indigènes et le fonctionnement des écosystèmes ont été encore peu étudiées.

L'évolution de certaines activités humaines à l'intérieur des parcs peut enfin modifier indirectement la biodiversité marine. Dans les publications scientifiques examinées, ces effets indirects ne sont documentés qu'en lien avec la réduction des activités de pêche. Les études portent principalement sur des parcs situés en Europe du Nord (mer du Nord et Manche), soumis à des régimes de gestion contrastés allant de l'interdiction totale de la pêche à des restrictions plus ciblées, telles que l'interdiction du chalutage ou des fermetures partielles. La diminution des prélèvements ou des perturbations associées peut ainsi produire un effet dit « réserve ». Des augmentations locales de biomasse, d'abondance ou de taille moyenne ont été observées chez certains organismes benthiques et plusieurs espèces exploitées, comme le homard ou la plie. Chez les poissons très mobiles, les réponses apparaissent plus variables selon les espèces, les sites et l'ancienneté des parcs. L'existence d'un effet de débordement, c'est-à-dire le déplacement d'individus depuis le parc vers les zones voisines, reste difficile à démontrer sur le terrain, même si des études de modélisation et de télémétrie suggèrent des échanges d'individus entre les parcs et les habitats environnants.

Que sait-on des mesures d'atténuation des effets?

Les mesures d'atténuation visent à agir sur les effets des parcs éoliens en mer sur la biodiversité. Elles s'inscrivent principalement dans la séquence « Éviter – Réduire – Compenser » (ERC), mobilisée lors de la planification, de la construction et de l'exploitation des projets. Les publications scientifiques consacrées à ces mesures portent toutefois majoritairement sur la réduction des effets (85 % des études), davantage que sur leur évitement ou leur compensation.

Les mesures d'évitement consistent à supprimer les effets potentiels à la source, dès les phases de planification et de choix des sites d'implantation, voire à renoncer à certains projets lorsque les enjeux environnementaux sont jugés trop importants. Elles reposent notamment sur l'évitement des principales zones de migration ou de reproduction de certaines espèces d'oiseaux et de mammifères marins, ainsi que des habitats et espèces protégés.

Les mesures de réduction concernent principalement les émissions sonores et les collisions. Pour limiter les perturbations acoustiques liées au battage des pieux, plusieurs dispositifs ont été testés pendant les travaux de construction, comme les rideaux de bulles, les barrières d'isolation acoustique ou les procédures de montée progressive de la puissance sonore (« soft start »), destinées à favoriser l'éloignement préalable des mammifères marins. Certaines études recommandent également d'adapter les calendriers de travaux afin d'éviter les périodes les plus sensibles pour les espèces.

Concernant les oiseaux et les chauves-souris, les principales mesures étudiées portent sur la réduction des risques de collision. Elles incluent notamment l'arrêt temporaire des turbines lors des périodes de migration ou sous certaines conditions météorologiques, l'augmentation de la vitesse minimale du vent nécessaire au démarrage des pales (« *cut-in speed* ») afin d'éviter leur rotation lorsque les conditions sont favorables aux déplacements de certaines espèces, ou encore l'utilisation d'éclairages spécifiques afin de limiter l'attraction des individus vers les structures.

D'autres mesures concernent les habitats et l'effet récif associé aux structures immergées. Certaines études portent par exemple sur le choix des matériaux ou des protections anti-affouillement afin de limiter la remise en suspension des sédiments, favoriser certains habitats benthiques ou soutenir le développement d'espèces ciblées, comme l'huître plate indigène. Pour les champs électromagnétiques, l'enfouissement des câbles électriques à une profondeur suffisante constitue la principale mesure proposée afin de réduire l'exposition des organismes sensibles.

Les mesures de compensation, enfin, restent les moins étudiées. Elles visent à restaurer ou recréer des habitats, des fonctions écologiques ou des conditions favorables à certaines espèces lorsque les effets n'ont pu être évités ou suffisamment réduits. Les approches étudiées reposent notamment sur la restauration d'habitats marins ainsi que sur l'éco-conception des infrastructures, qui peut également contribuer ou compléter certaines mesures de compensation.

Quelles lacunes de connaissances persistent?

Malgré l'augmentation rapide du nombre de publications scientifiques consacrées à l'éolien en mer, l'expertise met en évidence plusieurs lacunes transversales importantes.

Certaines pressions demeurent peu étudiées, notamment les émissions chimiques, la lumière artificielle ou l'introduction d'espèces non indigènes, tout comme les conséquences de la multiplication des parcs sur certains processus à l'échelle du paysage marin, tels que la connectivité écologique entre habitats.

Il existe d'importants biais taxonomiques dans la littérature scientifique, qui se concentre largement sur les oiseaux marins, les mammifères marins — notamment le marsouin commun — ainsi que certaines espèces commerciales de poissons. À l'inverse, d'autres groupes biologiques sont moins étudiés, comme les invertébrés benthiques, les algues, le plancton et autres micro-organismes, les communautés pélagiques ou encore les chauves-souris.

Les travaux portent encore majoritairement sur des réponses observées à des échelles locales ou individuelles. Les connaissances manquent concernant les niveaux d'organisation écologique les plus intégrateurs, notamment les réseaux trophiques, la connectivité écologique, les dynamiques écosystémiques ou encore les processus génétiques et évolutifs, qui renseignent notamment sur la capacité d'adaptation des populations.

Le manque de données de long terme constitue une autre limite majeure. La plupart des études disponibles couvrent des périodes souvent inférieures à dix ans, alors que les effets écologiques peuvent se manifester progressivement sur plusieurs décennies. Des suivis longs sont pourtant indispensables pour distinguer les effets liés aux parcs éoliens de la variabilité naturelle des écosystèmes, mais aussi pour mieux comprendre les liens entre réponses individuelles, dynamiques de populations et transformations des écosystèmes marins.

Les approches multi-pressions demeurent elles aussi insuffisamment développées, ce qui limite la caractérisation des effets cumulés, indirects ou synergiques. Les travaux scientifiques reposent encore largement sur des analyses pression par pression, alors que les parcs éoliens combinent plusieurs pressions susceptibles d'interagir entre elles et avec d'autres pressions anthropiques déjà présentes dans les espaces marins, comme la pêche, le transport maritime, les pollutions ou le changement climatique.

La question de la transposabilité des résultats constitue également un point d'attention de cette expertise. À la différence des parcs éoliens posés implantés sur des fonds sableux de la mer du Nord et de l'Atlantique Nord, les eaux françaises présentent une grande diversité de contextes écologiques, hydrodynamiques et bathymétriques, notamment en Méditerranée, où le développement futur de l'éolien flottant soulève des questions encore sans réponse.

Les connaissances relatives au démantèlement des installations demeurent largement insuffisantes, alors même que de nombreux parcs devraient atteindre leur fin de vie dans les prochaines décennies. Les effets écologiques associés à

cette phase — retrait total ou partiel des structures, remise en suspension des sédiments, devenir des habitats artificiels créés par l'effet récif — sont méconnus. La question du maintien partiel de certaines structures en mer (« *renewable energy to reef* ») est ainsi soulevée, notamment en raison de l'effet récif susceptible de s'être développé au cours de l'exploitation.

La comparabilité des études reste souvent difficile en raison de la forte hétérogénéité des protocoles de suivi, des méthodes statistiques et des indicateurs mobilisés. Cette diversité méthodologique limite les comparaisons entre sites, la réalisation de méta-analyses — analyses statistiques combinant plusieurs études indépendantes — et la production de synthèses généralisables à différents contextes environnementaux et technologiques.

Enfin, les travaux scientifiques sur les mesures d'atténuation des effets se concentrent sur quelques groupes biologiques — principalement les mammifères marins, les oiseaux et, dans une moindre mesure, les chauves-souris — ainsi que sur certaines pressions, notamment le bruit sous-marin et les risques de collision. De nombreux effets potentiels, comme les modifications des habitats, les dynamiques trophiques ou les effets cumulés à grande échelle, demeurent peu pris en compte dans les stratégies étudiées. Par ailleurs, près des deux tiers des études portent sur des mesures qui n'ont pas été testées in situ dans des conditions réelles, ce qui limite encore l'évaluation de leur efficacité opérationnelle et de leurs effets à long terme.

En savoir plus

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, Alexeï 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.

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/Expertise

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

