

Synthèse de connaissances

Impacts de l'éolien *offshore* sur la biodiversité et recommandations pour l'évaluation des risques

REFERENCE

Hélène Soubelet, Claire Salomon, Jean-François Silvain, 2023. *Impacts de l'éolien offshore sur la biodiversité et recommandations pour l'évaluation des risques*. Synthèse de connaissances. Fondation pour la recherche sur la biodiversité

COORDINATION ET REDACTION

Hélène Soubelet, Claire Salomon et Jean-François Silvain

Cette publication a été réalisée dans le cadre du programme « **Impact des énergies renouvelables sur la biodiversité** ». Ce programme de financement de projets de recherche porté par la **Fondation pour la recherche sur la biodiversité (FRB)** et le **Mirova Research Center** vise à mieux évaluer l'impact des énergies renouvelables sur la biodiversité et à produire des recommandations opérationnelles sur de meilleures pratiques à destination des acteurs de la filière.



INTRODUCTION

Les impacts de l'éolien *offshore* ont des effets qui, par leur intensité, leur durée ou leur gravité, provoquent des changements significatifs sur la biodiversité (Willstead *et al.*, 2018).

Depuis le déploiement des premières installations éoliennes *offshores*, des controverses sont nées autour de leurs coûts et bénéfices économiques et environnementaux. De nombreux travaux de recherche se sont donc efforcés d'évaluer les impacts, positifs ou négatifs de ces dispositifs sur la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes marins, ce qui a généré une abondante littérature. Ces impacts sont très variables et différents selon le cycle de vie de l'installation, l'emplacement, le type de turbine employée, le type de fondations et d'ancrages, les structures annexes associées et les espèces présentes qui interagissent avec ces infrastructures. Ces installations sont principalement situées dans des parcs éoliens (*Offshore Wind Parcs* en anglais, OWF), plus ou moins étendus, à plus ou moins grande distance des côtes, or les territoires côtiers sont aussi des zones de forte biodiversité, des zones culturellement riches et où le partage des usages des terres, de la mer, des ressources est un vrai enjeu. Il convient ici d'être conscient que l'utilisation des énergies renouvelables marines participe à l'accroissement global des activités humaines dans les habitats marins (Vilela *et al.*, 2021).

En 2019, une première revue rapide de la littérature scientifique sur les incidences des infrastructures de production d'énergie renouvelable sur la biodiversité a permis de considérer près de 400 publications scientifiques (entre 1974 et 2020) sur l'énergie éolienne terrestre et marine et mis en évidence les impacts négatifs suivants, essentiellement sur les oiseaux et les chauve-souris (Fondation pour la recherche sur la biodiversité, 2019) :

- la mortalité par collision ou barotraumatisme due aux pâles en mouvement ;
- la mortalité causée par la perte ou la modification de l'habitat ;
- l'effet barrière avec le comportement d'évitement des parcs, le déplacement de certaines populations ;
- les perturbations liées au bruit et aux champs électromagnétiques provoqués par ces installations lors de leur mise en place ou lors de leur fonctionnement (sur les mammifères marins notamment) ;
- les perturbations liées à la pollution lumineuse par les éclairages de signalisation des éoliennes entraînant une perturbation dans le déplacement des espèces la nuit.

Ainsi que des effets positifs :

- un effet « récif », entraînant la colonisation de la base de l'installation par les communautés d'espèces marines ;
- un effet réserve dû à l'exclusion des activités de pêche et à la création *de facto* de zone protégées.

D'autres risques ou impacts sont moins documentés, mais réels, comme l'augmentation des risques de dissémination d'espèces non indigènes et d'homogénéisation de l'habitat à grande échelle, la perte de valeurs environnementales socioculturelles et touristiques. De manière plus globale, l'incidence à moyen et longs termes de l'installation de nombreuses fermes éoliennes sur le fonctionnement des écosystèmes marins reste à documenter.

Les installations éoliennes en mer peuvent donc avoir des impacts positifs et négatifs avérés sur la biodiversité et les ressources halieutiques, mais il est difficile de formuler des réponses globales et univoques à la question de savoir si les impacts causés par ces installations sont globalement « positifs », « négatifs » ou « neutres ». De telles conclusions sont très dépendantes des communautés biologiques ou espèces concernées et associent à la fois des dimensions quantitatives (le nombre de collisions d'oiseaux par exemple) et qualitatives (les mortalités induites chez des espèces longévives et à faible natalité n'auront pas les mêmes conséquences que chez des espèces à cycle court et fort taux de reproduction).

Même s'il persiste d'importants obstacles techniques qui s'opposent à une quantification précise des impacts directs et indirects des installations éoliennes en mer (par exemple la quasi impossibilité de dénombrer les mortalités aviaires), et des incertitudes et lacunes de connaissances (voir annexe 2), en particuliers en matière de quantification des impacts des pressions cumulées suite à la multiplication prévues de fermes éoliennes en France et en Europe, le nombre des publications scientifiques sur le sujet ne cesse d'augmenter, notamment au cours des huit dernières années, en cohérence avec le développement de cette énergie au niveau mondial (annexe 1).

Le présent document constitue une revue exploratoire des derniers résultats issus des publications scientifiques sur l'énergie éolienne *offshore* (chapitre 1) et des recommandations associées (chapitre 2).

Table des matières

Introduction	3
Chapitre 1 : Mise à jour des connaissances sur les impacts des installations éoliennes <i>offshore</i> sur la biodiversité	6
1.1. Synthèse de la revue de la littérature (Galparsoro <i>et al.</i> , 2022).....	6
1.2. Impacts sur les espèces vivantes.....	11
1.1.1. Impacts sur les oiseaux.....	11
1.1.2. Impacts sur les mammifères.....	13
1.1.3. Impacts sur les poissons	14
1.1.4. Impact sur les communautés benthiques	16
1.1.5. Impacts sur les espèces rares	18
1.1.6. Impacts sur les espèces non indigènes	18
1.2. Typologie des pressions exercées par les installations éoliennes marines sur la biodiversité en fonctions des différentes phases de déploiement (construction et fonctionnement)	19
1.2.1. Phase de construction	19
1.2.2. Phase de fonctionnement.....	20
1.3. Impacts sur les services écosystémiques.....	22
1.3.2. Services de régulation.....	24
Chapitre 2 : Recommandation pour la gestion et la prise de décision.....	28
Annexe 1 : Lacunes de connaissances sur les impacts des installations éoliennes <i>offshore</i>	37
Annexe 2 : Bibliographie.....	40

Chapitre 1 : Mise à jour des connaissances sur les impacts des installations éoliennes *offshore* sur la biodiversité

Ce chapitre s'appuie principalement sur une synthèse récente de la littérature sur les impacts de l'éolien marin (Galparsoro *et al.*, 2022) et un article qui traite de la typologie des pressions exercées par ces installations et leurs effets sur les services écosystémiques (Baulaz *et al.*, 2022). Ces éléments ont été complétés par les informations, références et réflexions de synthèse incluses dans le texte de l'autosaisine du Conseil national de la protection de la nature (CNP) consacrée au développement de l'énergie *offshore* en France et ses impacts sur la biodiversité, le patrimoine naturel et les paysages. Enfin, des compléments ont été apportés par l'analyse de la littérature scientifique récente sur le sujet.

1.1. Synthèse de la revue de la littérature (Galparsoro *et al.*, 2022)

Une revue récente de la littérature (Galparsoro *et al.*, 2022) a analysé les 867 résultats en matière de pressions de l'éolien *offshore* sur la biodiversité, extraits de 158 publications scientifiques. La nature de ces publications et la nature des installations concernées sont présentées dans la figure 1.

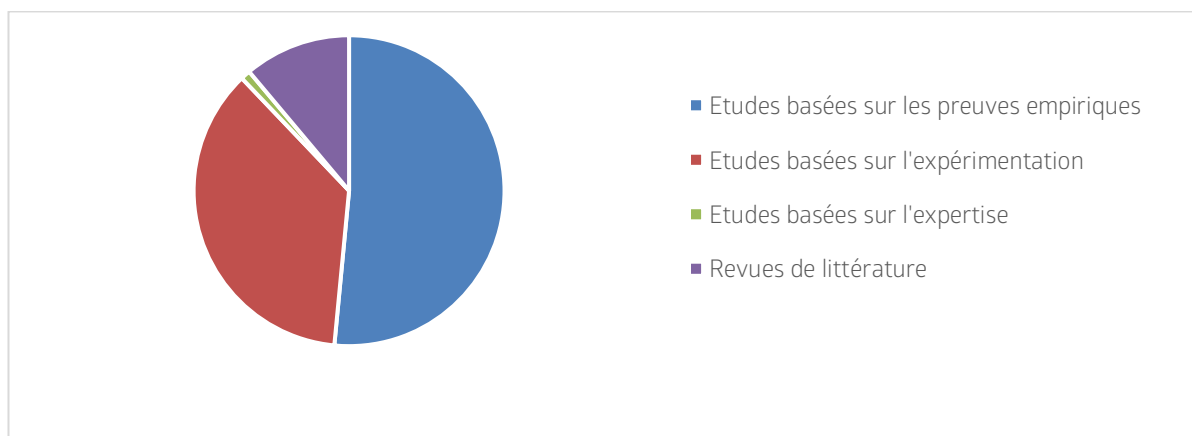


Figure 1 : Pourcentage d'études concernées sur les 158 études collectées

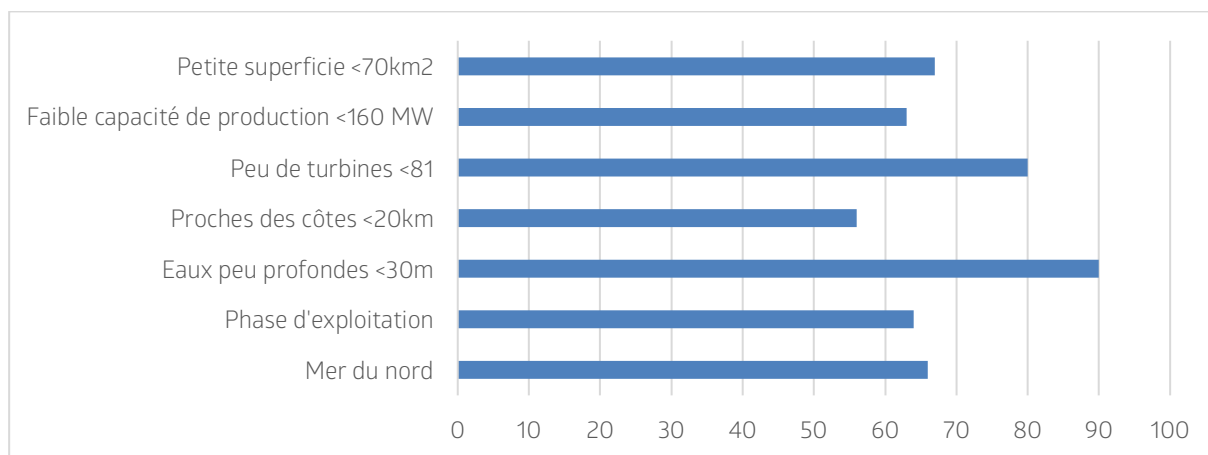


Figure 2 : Pourcentage d'études concernées sur les 158 études collectées

Les 867 résultats extraits des publications analysées, montrent que 72 % ont rapporté des impacts négatifs, tandis que 13 % ont rapporté des impacts positifs. 54 % des impacts ont été signalés comme élevés ou modérés, tandis que 32 % des impacts ont été qualifiés de faibles ou négligeables.

La figure suivante montre les preuves scientifiques relatives aux impacts sur les trois dimensions importantes de l'intégrité écologique d'un écosystème : sa composition (donc impact sur différents groupes biologiques comme les poissons, les oiseaux etc.), sa structure (impact sur les habitats, homogénéisation biotique, etc) et ses fonctions (impacts sur les interactions entre espèces, leur capacité d'adaptation, par exemple).

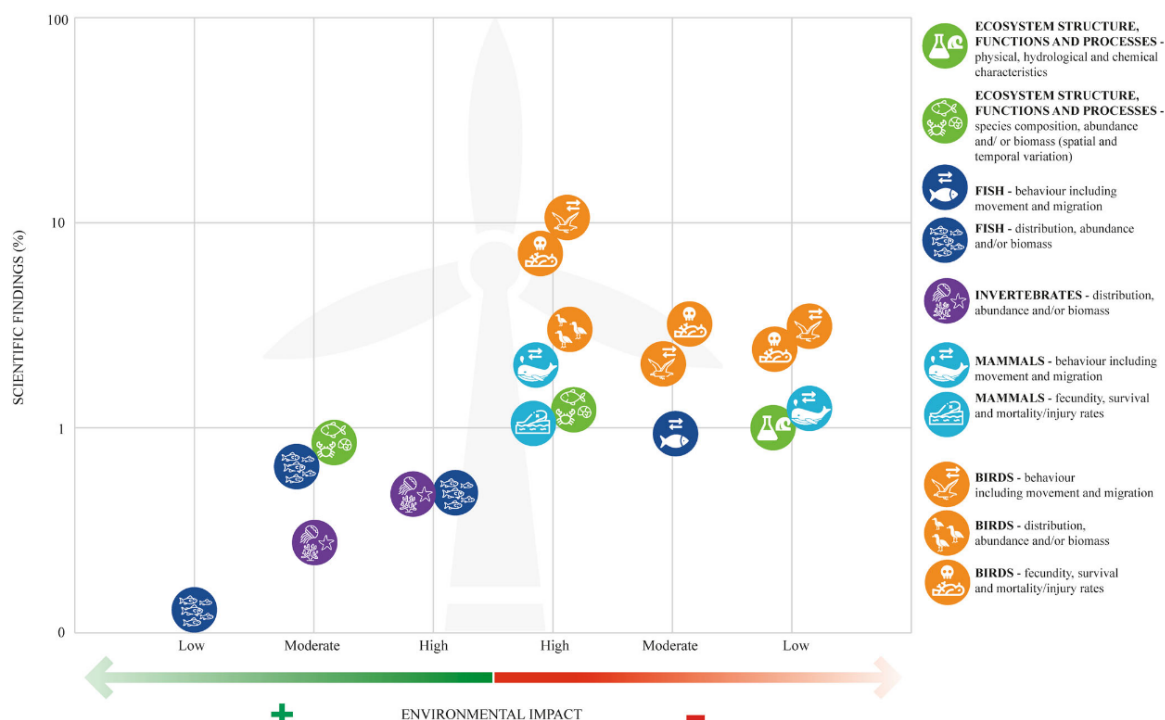


Figure 3 : Nombre d'études rapportant des impacts positifs ou négatifs en fonction des variables de biodiversité étudiées (groupes taxonomiques, structure et fonction des écosystèmes)

La synthèse des résultats scientifiques illustre que la production d'énergie *offshore* peut avoir à la fois des effets positifs et négatifs sur les écosystèmes marins.

On constate en particulier que les impacts sont plus souvent négatifs et mieux documentés (haut niveau de consensus scientifique) sur les oiseaux, les mammifères marins et la structure des écosystèmes. Alors que des impacts positifs sont moins souvent documentés (incertitude plus grande), sur les poissons et les invertébrés. Les impacts sur les fonctions écosystémiques peuvent être à la fois positifs et négatifs, mais sont en général encore peu documentés.

Une difficulté complémentaire pour l'évaluation des impacts est que les risques écologiques liés aux installations éoliennes *offshore* varient spatialement en fonction des caractéristiques environnementales locales, de la vulnérabilité des groupes vivants présents (par exemple, présence d'espèces d'oiseaux migrateurs particulièrement sensibles aux éoliennes), de l'état initial et de la résilience de la zone, qui peut changer considérablement pour certains éléments de l'écosystème.

Par ailleurs, le nombre de publications scientifiques joue un rôle important dans l'interprétation de la robustesse de la caractérisation d'un impact (par exemple, lorsqu'un seul article décrit l'impact et l'ampleur d'un type de pression sur un élément de l'écosystème, l'interprétation doit être prudente).

Sur les 867 résultats recensés, 10 pressions ont été évaluées, les plus fréquentes dans la littérature étant celles associées aux perturbations biologiques et au bruit (62 % et 18 % des résultats, respectivement). Le manque d'études traitant de plusieurs pressions ou de plusieurs éléments du

fonctionnement des écosystèmes constitue une lacune dans l'analyse des impacts des dispositifs éoliens (voir annexe 2).

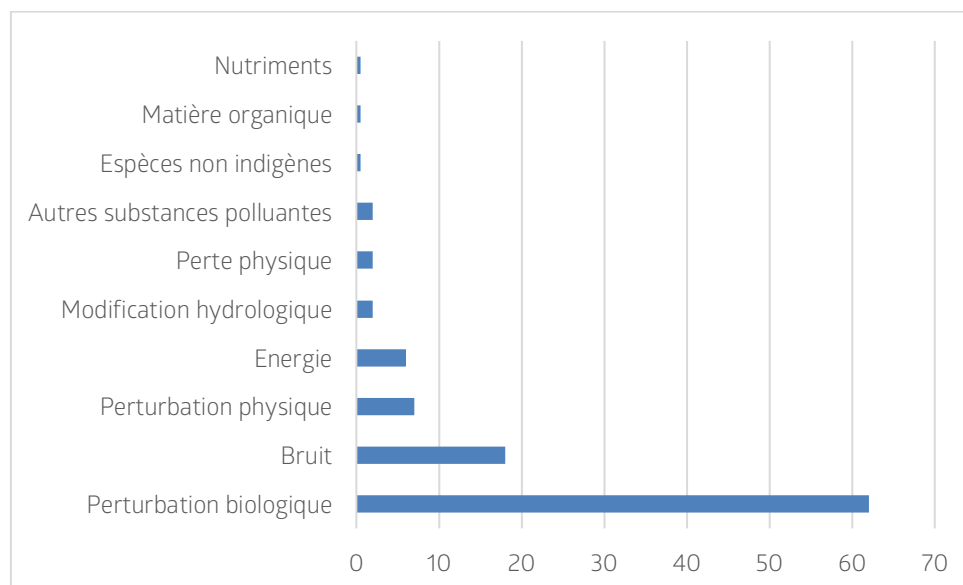


Figure 4 : Types de pressions exercées - % d'études concernées sur les 158 études collectées

Perturbation biologique
Perturbation physique
Perte physique
Son (y compris bruit)
Apport d'énergie (y compris champs électromagnétiques)
Changement hydrologique
Espèces non indigènes
Apport de nutriments
Apport de matière organique
Apport d'autres substances (organiques et inorganiques)

Tableau 1 : Types de pressions à considérer

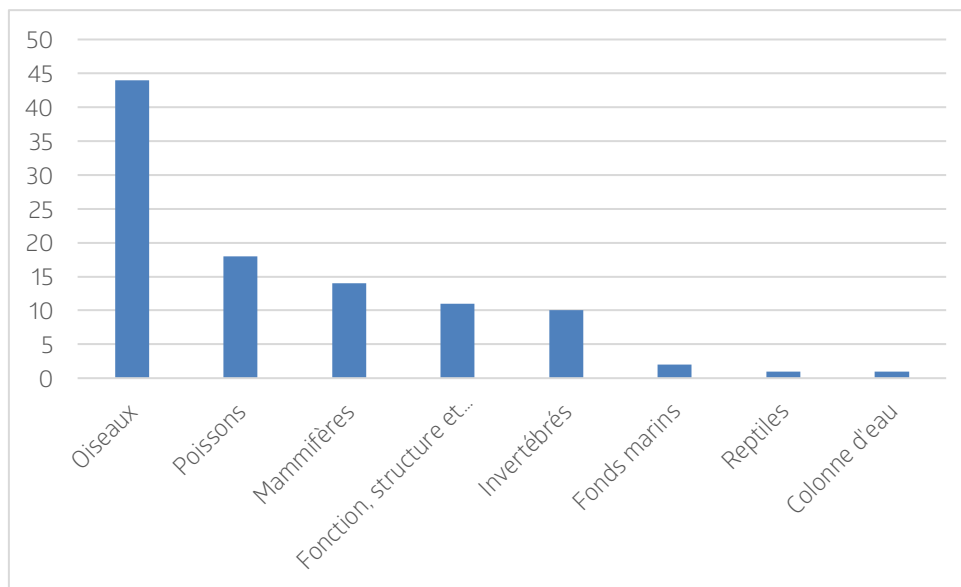


Figure 5 : Qui est impacté ? - % d'études concernées sur les 158 études collectées

87 % des publications s'intéressent aux espèces (en particulier les oiseaux et dans une moindre mesure les poissons), 11 % aux structure, fonctions et processus de l'écosystème et 3 % aux habitats (fonds marins et colonne d'eau).

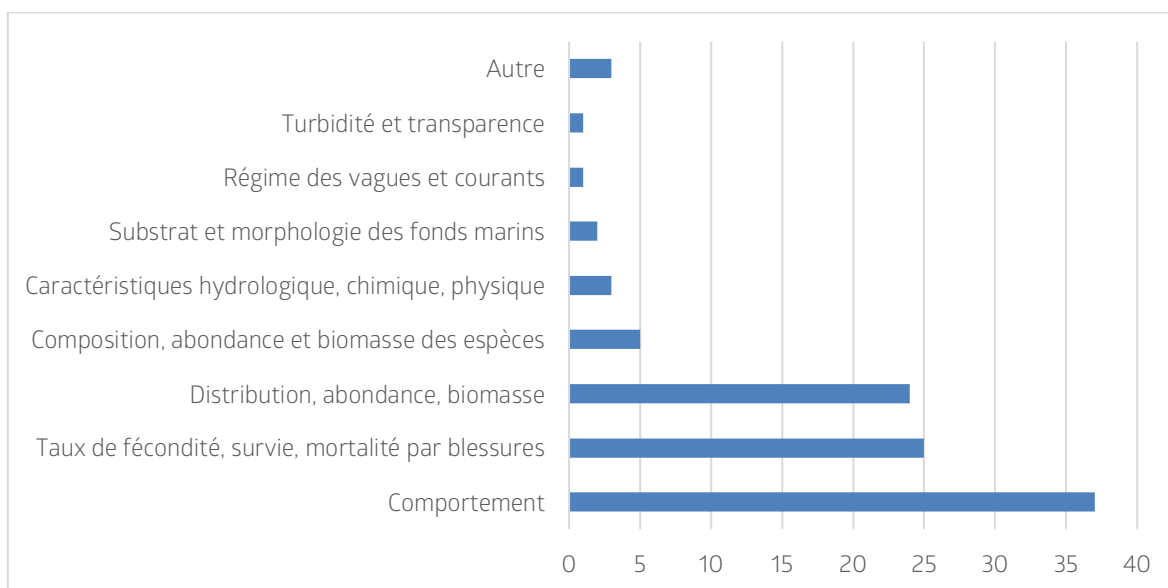


Figure 6 : Types d'impacts - % d'études concernées sur les 158 études collectées

Les indicateurs les plus étudiés dans la littérature sont le comportement (37 %), les taux de fécondité, survie, mortalité par blessure (25 %) et la répartition, abondance et/ou la biomasse vivante (24 %).

Une description des impacts par groupes d'espèces est également possible. Il faut alors croiser les pressions (voir tableau 1), le type d'impact (positifs ou négatif) et leur ampleur (voir figure 5 et 6 présentant le pourcentage des études rapportant des impacts liés aux perturbations biologiques et au bruit).

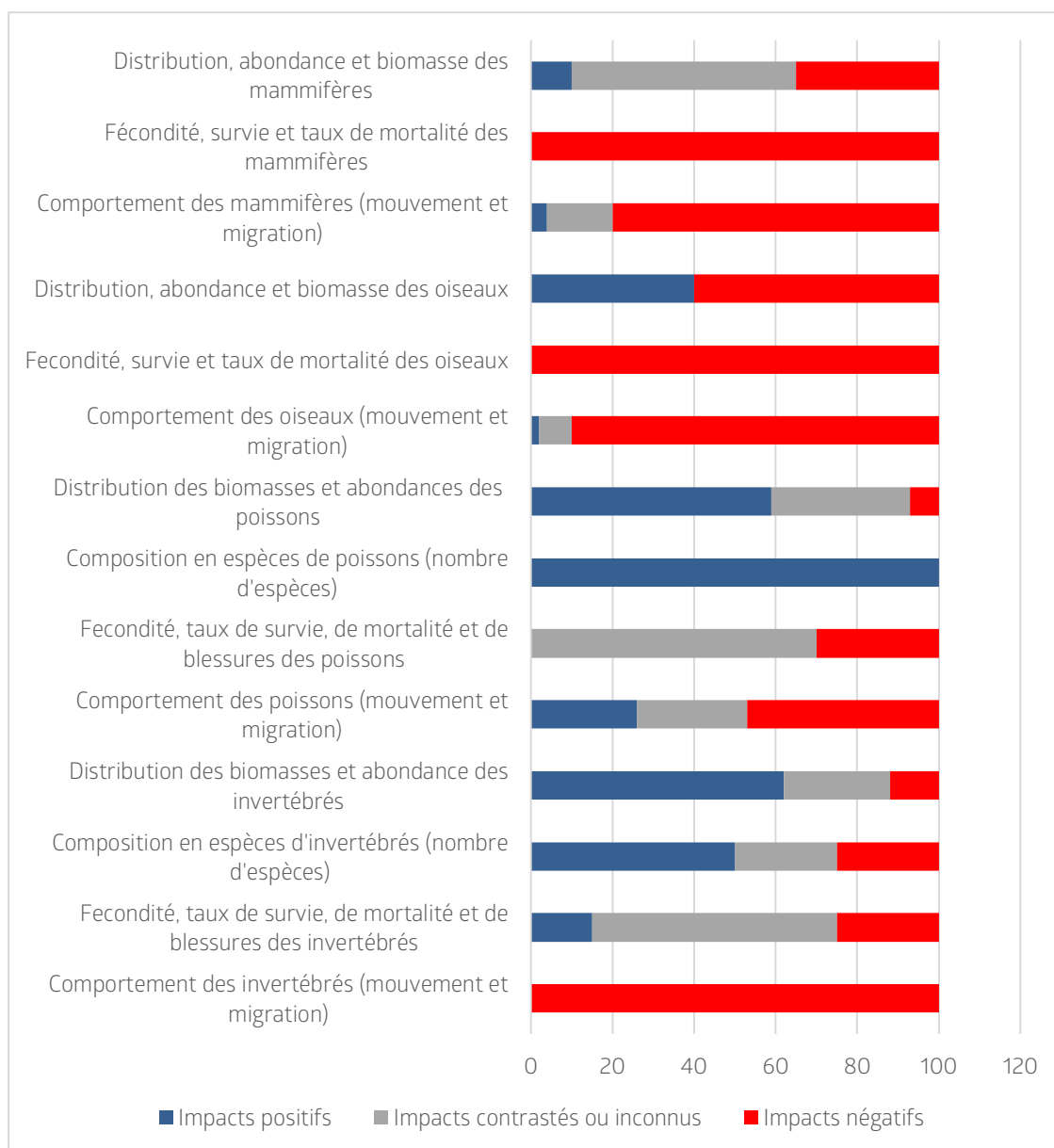


Figure 8 : Sens et nature des impacts (perturbations biologiques) liées aux l'installation en activité (en % d'études rapportant des impacts)

La figure 8 présente le pourcentage d'études rapportant des impacts liés aux perturbations biologiques engendrées par l'installation sur des indicateurs pour les mammifères, les oiseaux, les poissons et les invertébrés (extrait de Galparsoro *et al.*, 2022, matériel supplémentaire). Globalement ce sont des impacts négatifs qui sont principalement décrits, en particulier sur la fécondité, survie, taux de mortalité, ainsi que le comportement des mammifères, des oiseaux et des invertébrés et des impacts qui peuvent être plutôt majoritairement positifs sur la composition en espèce de poissons, la distribution et l'abondance des poissons et des invertébrés.

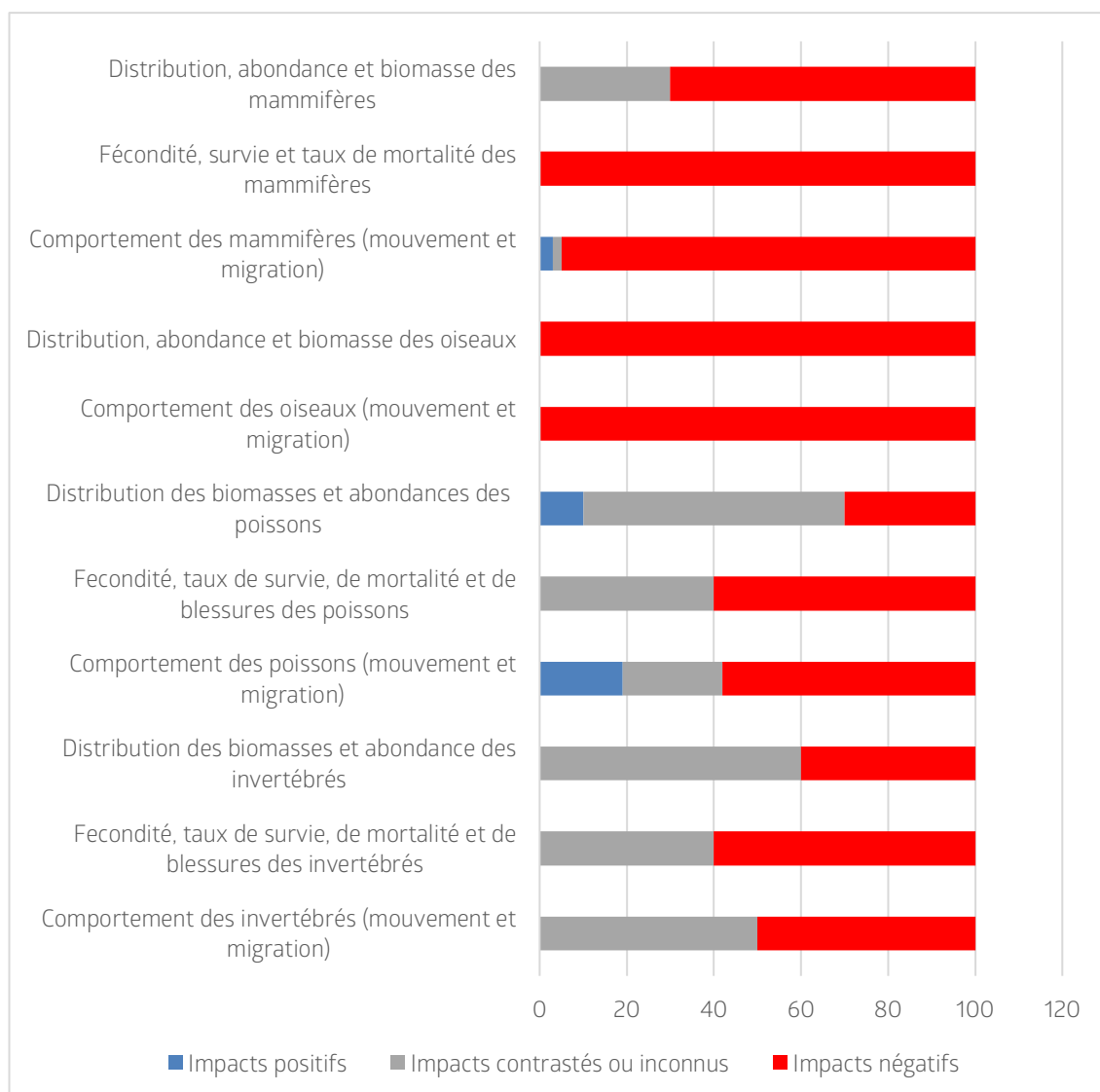


Figure 9 : Sens et nature des impact liés aux sons des installations en activité (% d'études rapportant des impacts) sur différents groupes taxonomiques

La figure 9 présente le pourcentage d'étude rapportant des impacts liés aux sons de l'installation sur des indicateurs pour les mammifères, les oiseaux, les poissons et les invertébrés (extrait de Galparsoro *et al.*, 2022, matériel supplémentaire).

1.2. Impacts sur les espèces vivantes

1.1.1. Impacts sur les oiseaux

Pour toutes les composantes de l'écosystème, les effets négatifs, élevés à modérés, représentent 45 % des résultats scientifiques, dont 32 % concernent des effets sur les oiseaux (changements dans l'abondance dus à la mortalité par collision ou déplacement, changements dans la distribution et modification du comportement pour éviter les installations). Les espèces ont des sensibilités contrastées aux pressions associées aux éoliennes, avec des réponses différentes selon leur écologie (par exemple l'altitude de vol, l'aire de présence, la période de migration, leur sexe).

On se réfèrera ici fréquemment au rapport d'auto-saisine du Comité national de protection de la nature sur ce sujet (CNP, 2021).

Mortalité par collision.

La hauteur de vol, par exemple, est un facteur potentiel de mortalité ; les oiseaux les plus patrimoniaux volant à hauteur de pales sont les Fous de Bassan, les Mouettes tridactyles et pygmées, les Sternes, les labbes, les Bernaches cravants et les plongeurs, qui sont potentiellement à risque (CNPN, 2021). Les collisions les plus fréquentes sont celles qui concernent les goélands, car ils sont présents en grand nombre, et en permanence, dans l'espace maritime côtier. Ces collisions sont problématiques, notamment pour le Goéland brun (*Larus fuscus*) et le Goéland marin (*Larus marinus*), peu nombreux ; la fréquence des collisions de goélands ne doit cependant pas, en comparaison, faire passer pour plus faibles les risques courus par les autres espèces (CNPN 2021).

Les impacts négatifs les plus évidents et les mieux documentés concernent notamment des espèces comme les guillemots (*Uria aalge*) et les fous de Bassan (*Morus bassanus*) qui ont un comportement d'évitement des installations en fonctionnement. Dans le cas du Guillemot de Troil (*Uria aalge*), en période de reproduction, une réduction de 75 % de la fréquentation des zones de parcs éoliens marins en activité a été par exemple estimée (Peschko *et al.*, 2020). Dans la partie allemande de la Mer du Nord, Garthe *et al.* (2023) ont mis en évidence une réduction de la densité de Plongeurs (Gaviidae) de 94 % à une distance de 1 km du parc éolien et de 52 % à 10 km de celui-ci. Ces phénomènes d'évitement et de perte d'habitat ont vraisemblablement un coût énergétique qui ne pourra que s'accroître avec la multiplication des parcs éoliens offshore (Schwemmer *et al.*, 2023). Une étude menée au Pays-Bas en prévision du développement des parcs éoliens en Mer du Nord indique que les plus grandes mortalités liées à la perte d'habitat dans les scénarios de développement sont prédites pour le Guillemot de Troil, et le Pingouin Torda (*Alca torda*), suivie par le Fulmar Boréal (*Fulmarus glacialis*) (Soudijn *et al.*, 2022). D'autres oiseaux marins tels que les goélands argentés (*Larus argentatus*), plus gros, semblent au contraire, attirés par les installations éoliennes en raison de la disponibilité accrue de nourriture leur permettant de se nourrir dans la zone intertidale des éoliennes (Vanermen *et al.*, 2017). Seuls 1 % des résultats scientifiques signalent des effets positifs élevés à modérés sur les oiseaux, par exemple, une attirance des goélands ou cormorans pour les installations, dont les structures peuvent servir de reposoirs (CNPN, 2021), mais qui leur fait aussi courir le risque d'entrer en collision avec les aubes de turbine (Vanermen *et al.*, 2020).

Ce type d'impact constitue un des éléments majeurs des controverses relatives à l'éolien marin et permet de poser un certain nombre de questions majeures en matière d'anthropisation de la planète et de place laissée aux non-humains. Il est par exemple important de bien différencier ce qui a trait aux mortalités directes et ce qui a trait aux réactions comportementales qui vont générer des pertes d'habitats *sensu lato* (perte d'habitats d'alimentation pour les oiseaux marins et modification des trajets migratoires), sources de mortalités indirectes. Il est essentiel aussi de faire ici une distinction entre oiseaux marins, souvent longévifs (ce qui signifie une faible mortalité des adultes) et à (très) faible taux de reproduction, et oiseaux terrestres à cycle court et fort taux de reproduction. Comme le souligne le rapport CNPN (2021), les Procellariés (Puffins, Fulmar), les Alcidés (Macareux, Guillemots, Pingouin) ou le Fou de Bassan ne pondent qu'un seul œuf par an, après une maturité sexuelle également lente, et vivent plus de 30 ans (jusqu'à 50 ans pour les Procellariés), contre une vingtaine d'œufs par an pour des mésanges dont les adultes ne vivent que deux ans. Les sternes et les Laridés (Goélands et Mouettes) ont une stratégie intermédiaire avec trois ou quatre œufs et une longévité qui peut atteindre une vingtaine d'années. Les oiseaux marins et terrestres vont migrer au-dessus des mers et être soumis aux mêmes risques de mortalité par collision, mais les impacts de celles-ci sur la dynamique de leurs populations seront différents : une augmentation de 5 % de mortalité est jugée incompatible à terme avec la survie des espèces d'oiseaux marins (Dierschke *et al.*, 2003), voire même 1% pour les espèces vulnérables ou en déclin (Everaert, 2013) (cité par CNPN, 2021). On retrouve dans le cas de l'éolien offshore des constats déjà fait au sujet de l'éolien terrestre dont les impacts sur les oiseaux doivent être pour partie évalués moins sur un plan quantitatif que qualitatif (impact majeur sur certains rapaces rares en particulier). Ces différences entre oiseaux marins et terrestres ne doivent toutefois pas conduire à négliger les risques de mortalité massives d'oiseaux terrestres lors de leurs déplacements migratoires la nuit dans certaines conditions

météorologiques dans la Manche et la Mer du Nord , mais aussi en Méditerranée où des centaines de millions d'oiseaux quittent les côtes à la tombée de la nuit entre le 1^{er} septembre et le 31 octobre, en sachant que 25% de cette migration nocturne a lieu à moins de 200 m d'altitude (CNPN, 2021).

Des études sur le long terme sont indispensables tant en matière d'évaluation de l'incidence, en particulier sur les oiseaux marins, des mortalités directes ou des effets des pertes d'habitats de reproduction ou d'alimentation ou encore des modifications des voies de migration sur la démographie des espèces concernées, tout en en connaissant les contraintes, notamment la quasi impossibilité de retrouver les cadavres d'oiseaux en mer. Il sera aussi essentiel de prendre en compte les effets cumulatifs associés à la multiplication des parcs éoliens marins, souvent contigus.

Les réflexions sur les impacts sur les oiseaux et sur les lacunes de connaissances à ce niveau devraient générer des suggestions en matière de réduction de ces impacts.

1.1.2. Impacts sur les mammifères

En ce qui concerne les mammifères marins, intégralement protégés en France, jusqu'à 7 % des résultats scientifiques attestent d'impacts négatifs, selon la phase de développement de l'installation. En phase de construction, le battage de pieux peut avoir un impact significatif sur la santé des mammifères, leur abondance et leur distribution, et par exemple, le comportement d'évitement des marsouins communs (*Phocoena phocoena*) quittant temporairement la zone de construction (Brandt *et al.*, 2018), un phénomène de zone d'exclusion que l'on va retrouver chez le Grand dauphin (CNPN, 2021). La perte de son habitat consécutive à des travaux de construction de longue durée a ainsi été évaluée et mesurée avec une certaine fiabilité en raison des connaissances acquises sur leur audiométrie et leur sensibilité aux fortes intensités (Bailey et al. 2012). Les observations sur des animaux en captivité suggèrent que le Grand Dauphin et le Phoque veau marin seraient aussi sensibles à ces pressions sonores (CNPN, 2021).

	Risque auditif aigu	Importance de la perte d'habitat	Conséquence populationnelle
Rorqual de Minke	Seuil inconnu	Inconnue	Effet inconnu
Marsouin commun	Seuil connu	Connue	Effet certain
Dauphin commun	Seuil inconnu	Inconnue	Effet inconnu
Grand dauphin	Seuil connu	Etudiée	Effet évalué
Phoque gris	Seuil inconnu	Inconnue	Effet inconnu
Phoque veau marin	Seuil connu	Etudiée	Effet évalué

Tableau 3 : Bilan des connaissances des effets des intensités sonores sur les mammifères marins présents en France (Alexandre Gannier pour le CNPN)

Après la phase de construction d'éoliennes en mer du nord, l'abondance des marsouins communs semblent augmenter, les animaux utilisant les installations plus fréquemment que les zones de référence (mais voir aussi Nachtsheim *et al.*, 2021, qui note une baisse de densité pour la même espèce). Ceci est potentiellement lié à l'accroissement de la disponibilité alimentaire en raison de la réduction de la pêche, des effets de récifs artificiels et l'absence de bateaux (effets positifs) ou, inversement, (effet négatif) à la baisse de la biomasse primaire disponible pour l'écosystème pélagique suite à l'augmentation de la biomasse de moules communes (CNPN, 2021). Russell *et al.*, (2014) ont démontré que des individus de phoques communs (*Phoca vitulina*) effectuaient des voyages de recherche de nourriture ciblés vers les parcs éoliens écossais. Comme le souligne le rapport du CNPN (2021), il ne fait pas de doute que certaines espèces vont s'adapter aux changements de cet environnement, d'autant plus avec la multiplication des fermes éoliennes, ce qui impactera l'écosystème marin entier. Ainsi, on ne peut exclure que l'installation à grande échelle d'éoliennes marines ait pour conséquence à long terme une augmentation notable de la population de Grand dauphin, attiré par la modification de la structure ichtyologique (au bénéfice de ses proies comme la morue ou le trisoptère par exemple), sur le plateau du Golfe de Gascogne, ou même favorise l'installation de colonies de Phoque gris, et consécutivement, il est possible que la population de Marsouin subisse les conséquences défavorables de l'augmentation d'abondance de ces deux espèces. Et

naturellement, la présence accrue de ces deux espèces aurait aussi un impact sur un autre prédateur de poissons : le pêcheur.

Cela illustre les suites insoupçonnées d'un changement de l'écosystème. Le CNPN (2021) souligne que les effets écosystémiques sont probables mais pas évaluables par modélisation et, en particulier, que les effets constatés sur les marsouins de Mer du Nord ne peuvent pas être extrapolés pour les autres espèces de mammifères marins des façades françaises, sachant aussi qu'il faudra prendre en compte les effets grandissant du changement climatique.

Nos connaissances sur les impacts de l'éolien *offshore* sur les chauves-souris est également faible, faute de pouvoir retrouver les cadavres, mais potentiellement élevés. Pour autant, nous savons maintenant que de nombreuses espèces de ce taxon (espèces longévives à faible natalité comme les oiseaux marins) effectuent des migrations au-dessus des surfaces marines. En conséquence, il faut pouvoir estimer en quoi la multiplication des fermes éoliennes viendra ajouter un facteur de mortalité à ces animaux et là aussi réfléchir à comment l'atténuer.

En effet, comme indiqué dans le rapport du CNPN (2021), la capacité des chauves-souris à franchir des distances maritimes importantes en migration est désormais bien connue d'après les observations faites à partir de bateaux ou de plateformes pétrolières ou gazières (Stansfield 1966, Boshammer & Bekker 2008, Ahlén *et al.* 2009, Rydell *et al.* 2014, Rodrigues *et al.* 2014) en Mer du Nord et Baltique. Le premier cas prouvé d'une migration entre l'Angleterre et le continent ne date que de 2013 avec une Pipistrelle de Nathusius (l'une des espèces les plus touchées par l'éolien terrestre) ayant parcouru 600 km entre le Somerset du Nord (Ouest de l'Angleterre) et les Pays-Bas (Bat Conservation Trust 2014). Plusieurs espèces scandinaves franchissent sans problème toute la Baltique sur 400 km entre la Suède et l'Allemagne ou 170 à 225 km entre la Suède et la Pologne par des vols de 9 h qui excèdent la durée de la nuit, mais certains individus peuvent se reposer sur des bateaux (Ahlén *et al.* 2009). En revanche on ignorait jusqu'à l'étude d'Ahlén *et al.* (2009) qu'un grand nombre d'espèces tant résidentes que migratrices (11 voire 14 espèces sur les 18 espèces scandinaves) s'alimentent en mer près des côtes jusqu'à une distance de 14 à 19 km entre la Suède et le Danemark, à la recherche d'insectes volants ou de crustacés flottants. En Belgique, Brabant *et al.* (2017) ont observé 4 espèces en mer dont la Pipistrelle de Nathusius jusqu'à 25 km des côtes, espèce également la plus présente en mer aux Pays-Bas (Lagerveld *et al.* 2014) (in CNPN, 2021).

Comme pour les oiseaux, la hauteur de vol influe sur la mortalité (collision directe avec les pales et barotraumatisme) et Ahlén *et al.* (2009) ont observé que tant les migratrices que les résidentes observées en mer généralement près de l'eau changent d'altitude en présence d'objets verticaux tels que les phares, bateaux ou mâts d'éoliennes et se retrouvent alors à hauteur des pales (CNPN, 2021). On ne peut pas non plus négliger qu'il y ait aussi, comme en milieu terrestre, une perte d'habitat d'alimentation pour des espèces utilisant le milieu marin à cet effet.

Les lacunes concernant l'écologie des chauves-souris sont importantes et des études sur le long terme sont nécessaires pour mieux évaluer l'incidence actuelle et future du développement de l'éolien *offshore* sur un taxon dont plusieurs espèces sont en régression en Europe et développer, des procédés et pratiques susceptibles de réduire de manière effective les mortalités ; une meilleure connaissance de la phénologie et des conditions climatiques associées aux migrations de chauves-souris permettrait probablement de progresser dans cette direction (Brabant *et al.*, 2021).

1.1.3. Impacts sur les poissons

Trois phénomènes peuvent se produire autour des récifs artificiels, sans s'exclure les uns les autres :

- une augmentation globale de l'abondance des poissons avec effets positifs sur la survie et la croissance (par exemple par économie d'énergie liée à la chasse) ;
- une simple attraction sans augmentation nette de la population locale ;
- ou une baisse de l'état de la population par un effet de piège écologique qui attire les individus vers un habitat sous optimal (Reubens *et al.*, 2014).

Par ailleurs, l'interdiction du chalutage de fond à proximité des installations pour des raisons de sécurité, élimine la pêche qui est la pression la plus importante sur la biodiversité marine (Ipbès, 2019).

Peu de recherches sont consacrées aux impacts, positifs ou négatifs sur les poissons. La revue de Galparsoro *et al.* (2022) documente 2 % de résultats d'impacts négatifs modérés et 2 % de résultats d'impacts positifs modérés. Ces impacts dépendent des espèces. Les plus vulnérables semblent être les élasmobranches (raies, requins), les grands migrants (par exemple le thon, *Thunnus spp.*) et les *Clupeidae* qui peuvent être dérangés, en fonction de la complexité de leur système auditif, par les bruits émis lors de la construction ou du fonctionnement de l'installation. Les élasmobranches seraient particulièrement sensibles à l'électromagnétisme dû aux câbles sous-marins (CNPN, 2021). Néanmoins la littérature documente aussi des effets positifs, en particulier ceux découlant des changements écologiques liés à l'effet récif, c'est-à-dire l'implantation de substrats durs sur des fonds initialement sableux : diversification et complexification des habitats, concentration des poissons et donc augmentation locale de la disponibilité en proies (Tickell *et al.*, 2019), ce qui attire les prédateurs et charognards. Des effets de débordement (c'est à dire une augmentation du nombre d'individus d'une espèce qui débordent sur les zones adjacentes) ont été documentés pour les petits poissons vivant proches des fonds marins (poissons démersaux), les poissons rocheux. Plusieurs études attestent d'une augmentation du nombre d'espèces, parfois supérieur au nombre d'espèces dans les récifs naturels (Zettler *et al.* 2006, Wilhelmsson *et al.*, 2008) et en tout état de cause, supérieur au nombre d'espèces dans les milieux sédimentaires adjacents. Cet effet récif peut aussi se traduire par la prolifération et l'extension d'espèce envahissantes (CNPN, 2021) et des espèces indigènes peuvent aussi disparaître (Degraer *et al.*, 2013). On ne doit pas négliger des pollutions chimiques potentielles liées à l'usage d'éléments structurels métalliques ou d'anodes destinées à lutter contre leur érosion et susceptibles de libérer de l'aluminium (CNPN, 2021, et tableau Baulaz *et al.*, 2023, ci-après).

Le cumul des changements à l'échelle de chaque installation, en particulier les effets récif à petite échelle, peut avoir des effets sur les services écosystémiques, comme l'augmentation de l'abondance des poissons exploités par la pêche. Il existe aussi des effets de trame (connexion des différents récifs) au sein des parcs qui concernent les différents stades (larves, adultes) en fonction des espèces et de leur biologie, y compris les espèces saisonnière ou opportuniste (Reubens *et al.*, 2014 ; Russel *et al.*, 2014).

Espèces qui bénéficient des installations	Nature et origine de l'impact positif sur l'espèce	Références scientifiques
Morue (<i>Gadus morhua</i>), tacaud (<i>Trisopterus luscus</i>), chabot arctique (<i>Myoxocephalus scorpioides</i>)	Prédatrices des communautés d'organismes qui colonisent les structures éoliennes	Mavraki <i>et al.</i> , (2020)
Chinchard de l'Atlantique (<i>Trachurus trachurus</i>)	Espèces prédatrices occasionnelles des organismes colonisateurs des structures éoliennes	Mavraki <i>et al.</i> , (2020)
Maquereau bleu (<i>Scomber scombrus</i>)	Raisons non trophiques, par exemple, pour trouver un abri ou pour rencontrer d'autres individus de leur espèce, ce qui peut les amener à créer des bancs plus grands et ainsi à accroître leur sécurité, leurs chances de trouver de la nourriture et des partenaires	Mavraki <i>et al.</i> , (2020)
Morue franche (<i>Gadus morhua</i>), tacaud (<i>Trisopterus luscus</i>), bar noir (<i>Centropristis striata</i>), napoléon (<i>Ctenolabrus rupestris</i>)	Passent au moins une partie de leur cycle de vie étroitement associée aux structures	Bergström <i>et al.</i> , 2013 ; Reubens <i>et al.</i> , 2014 ; Wilber <i>et al.</i> , 2020
Tacaud (<i>Trisopterus luscus</i>)	Les populations se portent mieux à l'intérieur des parcs qu'à l'extérieur, en été et en automne, pendant les phases juvéniles, avant leur migration vers ses zones de frayères en dehors des eaux belges	Reubens <i>et al.</i> (2014)
Six autres espèces de poissons plats	Effet bénéfique des parcs éoliens sur l'afflux larvaire vers les frayères de la côte sud de la mer du nord.	Barbut <i>et al.</i> (2020)

Tableau 5 : Exemple d'espèces qui bénéficient des installations éoliennes (extrait de Galparsoro *et al.* 2022)

1.1.4. Impact sur les communautés benthiques

Dans la revue systématique conduite par Galparsoro *et al.* (2022) les études ont rapporté majoritairement des effets positifs, mais restent peu nombreuses sur les communautés benthiques, c'est-à-dire les êtres vivants sur le fonds des océans.

Il y a deux angles à considérer ici. En premier lieu, il y a des impacts positifs directs du fait des effets récifs et réserves. Ces effets sont principalement dus à la succession écologique suite à la modification du milieu. Ici, les espèces qui colonisent ce nouveau milieu modifient le fonctionnement local de l'écosystème et permettent la colonisation par de plus en plus de biodiversité. En second lieu, ces installations semblent avoir moins d'impacts négatifs que d'autres types d'installations ENR, en particulier un meilleur rendement permettant une utilisation moindre de l'espace naturel, de moindres impacts sur les paysages, moins de bruits et des coûts de production et de livraison inférieurs.

Successions écologiques sur et autour des installations éoliennes.

Les parcs éoliens et la concentration d'organismes marins qu'ils induisent ont des conséquences sur la structure et le fonctionnement des écosystèmes, au moins à l'échelle locale (Degraer *et al.* 2020).

Au stade pionnier, dans les deux premières années, il y a une réponse écologique structurelle à la perturbation que représente la perte d'habitat, généralement des sédiments mous, dus à l'implantation des installations. Ce nouvel habitat est colonisé par la flore et la faune et une augmentation de la diversité et de la biomasse par rapport aux sédiments mous environnants. Les espèces colonisatrices peuvent inclure des espèces non indigènes qui étendent leur répartition spatiale ou renforcent leurs populations, des espèces localement rares (par exemple, des poissons associés aux substrats durs) et des espèces formant des habitats qui augmentent encore la complexité de l'écosystème.

ROLE DES ESPECES FORMANT HABITAT

Certaines espèces créent elles-mêmes des habitats et favorise un « l'effet tremplin ». Avec le temps, ces espèces peuvent développer des récifs biogéniques secondaires qui pourraient abriter de nombreuses espèces - souvent rares - et améliorer le fonctionnement de l'écosystème. Il est important de comprendre le rôle de cet habitat artificiel dans le maintien des populations locales de ces espèces rares, car il est susceptible d'avoir des implications pour le déclassement futur des parcs éoliens (Fowler *et al.*, 2020).

L'espèce colonisatrice la plus prédominante sur les installations éoliennes est la moule bleue (*Mytilus edulis*) avec de profonds effets de bio-ingénierie et de construction de récifs sur les sédiments environnants. D'une part, les coquilles de moules forment une litière au pieds des éoliennes ou à plus longue distance, par transport passif et peuvent servir d'habitat à d'autres espèces. D'autre part, des moules peuvent constituer des agrégats avec des communautés macrofauniques sur les sédiments. Cela a été constaté sur des sédiments meubles près des turbines (<50 m) dans les eaux belges (Lefaible *et al.*, 2019) et américaines. L'étendue spatiale et la longévité de ces agrégations est mal connue, en particulier leur contribution à restaurer les fonctions des récifs de bivalves qui consistaient historiquement en des lits d'*Ostrea edulis* en mer du Nord (Bennema *et al.*, 2020).

Dans une seconde phase, entre 3 et 5 ans, se produit une diversification biologique et fonctionnelle avec l'apparition d'organismes dits suspensivores qui transforment en nutriments partiellement dissous et biodisponibles la matière organique pélagique vivante en suspension dans la colonne d'eau (phytoplancton, zooplancton et détritus) et produisent des (pseudo)féces qui sont en partie déposées sur le fond marin (confer tableau 2). Plus de 95 % de la biomasse sur les structures artificielles peut être composée de diverses espèces de suspensivores (Coolen *et al.*, 2020b), dont plusieurs sont très flexibles en termes de ressources, passant d'une source de nourriture en suspension à une autre, peut-être en raison d'une compétition interspécifique ou bénéficiant de sources de nourriture disponibles en abondance (Mavraki *et al.*, 2020a). En filtrant l'eau, les organismes éliminent les particules, ce qui réduit la turbidité et augmente la pénétration de la lumière. Cet effet « biofiltre » a été démontré à l'échelle locale et en laboratoire, cependant, une compréhension approfondie de cet effet en conditions réelles, notamment dans les grands parcs *offshore* fait actuellement défaut (Dannheim *et al.*, 2020). Il peut y avoir également un épuisement local de la matière organique de la colonne d'eau et une augmentation de la matière organique dans les fonds marins par les dépôts fécaux qui modifient les communautés environnantes en augmentant localement la disponibilité de nourriture. Les niveaux trophiques supérieurs (poissons, oiseaux, mammifères marins) peuvent profiter de cette disponibilité alimentaire accru et d'abris.

Espèce	Mode d'action	Remarque
Moule bleue <i>Mytilus edulis</i>	Filtre activement l'eau et en ingère les particules	Une des espèces les plus abondantes

Amphipode <i>Jassa herdmani</i>	Attrapent les particules de l'eau qui passe pour les manger et pour construire leurs tubes	
Anémone plumeuse <i>Metridium senile</i>	Étend passivement ses tentacules dans l'eau, attend que les particules s'y collent, puis absorbe les particules	Très abondante

Tableau 2 : Quelques suspensivores et leur mode d'action

Le stade climacique, après 6 ans, présente la co-dominance par les anémones plumeuses (*Metridium senile*) et des moules bleues (*Mytilus edulis*) (Kerckhof *et al.*, 2019) dans les sections les plus anciennes et les plus profondes (~ 15 à 50 m) (Coolen *et al.*, 2020a). A long terme, la section verticale des fondations *offshore* forme un habitat uniforme où dominent quelques espèces compétitives. Par ailleurs, les zones d'exclusion au sein du parc éolien concentrent des espèces prédatrices et très mobiles.

1.1.5. Impacts sur les espèces rares

Le changement d'habitat et notamment l'apparition de substrats durs dans un environnement composé en grande partie de substrats mobiles mous peut favoriser l'installation et la propagation d'espèces localement rares, voire menacées. Ce phénomène devrait augmenter avec le déploiement des parcs éoliens qui peuvent donc contribuer à la taille, à l'étendue et à la connectivité des populations de ces espèces de poissons (voir des exemples dans le tableau 4).

Zone géographique	Espèces rares documentées	Commentaires
Mer du Nord	Balane (<i>Balanus perforatus</i>) (De Mesel <i>et al.</i> , 2015).	Espèces à substrat dur
Installations âgées de 5 ans en mer du nord	Baliste gris (<i>Balistes carolinensis</i>) et ctenolabre (<i>Ctenolabrus rupestris</i>) (Van Hal <i>et al.</i> , 2017)	Trois fois plus de poissons ont été observés sur les structures dures par rapport au fonds sableux
Parc éolien de Block Island (USA) et en mer du Nord	Apparition du corail (<i>Astrangia poculata</i>), corail pierreux (<i>Desmophyllum pertusum</i>) et huître plate européenne (<i>Ostrea edulis</i>) (Kerckhof <i>et al.</i> , 2018)	

Tableau 4 : Exemple d'espèces rares trouvées dans les sites d'implantations éoliennes

1.1.6. Impacts sur les espèces non indigènes

Le déploiement d'installations éoliennes crée des habitats nouveaux en haute mer et offrent une niche vide aux espèces non indigènes pour étendre leur distribution ou renforcer leurs populations. Pour l'instant, il n'y a pas de rapports publiés sur l'expansion de l'aire de répartition des espèces non indigènes infralittorales liées à l'installation d'éoliennes. Bien qu'il y ait des inquiétudes quant au fait que ces parcs pourraient constituer une menace pour les communautés autochtones (Glasby *et al.*, 2007 ; Adams *et al.*, 2014), celle-ci n'a pas encore été démontrée.

Plusieurs espèces ont ainsi été documentées (voir tableau 3 pour des exemples).

Zone géographique	Espèces indigènes documentées	Commentaires
-------------------	-------------------------------	--------------

Sud de la mer du Nord	Huître creuse (<i>Crassostrea gigas</i>) et la cécidomyie marine (<i>Telmatogeton japonicus</i>) (De Mesel <i>et al.</i> , 2015)	Zone historique d'installation des parcs éoliens dans les eaux peu profondes et côtières
Échantillons subtidaux Belgique	Crépidule, (<i>Crepidula fornicata</i>)	
Échantillons subtidaux Pays-Bas	Six des onze espèces non indigènes ont été trouvées (Coolen <i>et al.</i> , 2020a).	
Parc éolien de Block Island (USA)	Ascidie non indigène et proliférante <i>Didemnum vexillum</i>	Observées sur la structure de fondation et en tant qu'épibionte des moules

Tableau 3 : Quelques exemples d'espèces non indigènes documentées dans les installations éoliennes *offshore* en Europe et aux USA

1.2. Typologie des pressions exercées par les installations éoliennes marines sur la biodiversité en fonctions des différentes phases de déploiement (construction et fonctionnement)

Une étude française (Baulaz *et al.* 2023) suggère que tous les compartiments trophiques seraient affectés par les installations éoliennes marines avec des intensités variables.

1.2.1. Phase de construction

Pressions	Étendue spatiale <i>Locale : 100 m autour de la turbine</i> <i>Zone tampon : 500 m à 4 km autour des parcs</i> <i>Régionale : jusqu'à 20 km autour du parc</i>	Impacts	Références
Modification de l'écosystème : réarrangement du benthos, augmentation de la turbidité, modification des flux de matière organique et de détrit	Locale	Possible anoxie benthique, Baisse des niveaux de lumière pour les producteurs primaires, Dommages physiques aux filtreurs et aux suspensivores, Étouffement des œufs pour les consommateurs secondaires et tertiaires.	Dannheim <i>et al.</i> , 2020, Lange et al., 2010
Modification de l'écosystème : creusement et concassage des fonds marins lors	Régionale	Mortalité de l'endofaune et des espèces sessiles et perte d'habitats essentiels. Des comportements de stress et d'évitement sont à noter pour les espèces capables de s'éloigner du chantier.	Degraer <i>et al.</i> , 2019

des fondations et du passage des câbles		Perte de plus de 27 % des producteurs primaires et des groupes de consommateurs primaires.	
Pollutions sonores et vibrations dues aux battages des pieux lors des fondations	Zone tampon	Dommages physiques et stress, Comportements d'évitement de la zone de construction et modifications de répartition des groupes d'espèces les plus sensibles (prédateurs supérieurs, notamment mammifères marins, et certaines espèces de poissons et de crustacés dans une moindre mesure).	Dannheim <i>et al.</i> , 2020, Degraer <i>et al.</i> , 2019, <u>Lindeboom et al., 2011</u> , <u>Petersen and Malm, 2006</u>

Tableau 6 : Pressions étendue spatiale et impacts pendant la phase de construction

Adapté de Baulaz *et al.*, 2023

1.2.2. Phase de fonctionnement

Pressions	Étendue spatiale <i>Locale : 100 m autour de la turbine</i> <i>Zone tampon : 500 m à 4 km autour des parcs</i> <i>Régionale : jusqu'à 20 km autour du parc</i>	Impacts	Références
Collisions avec les mâts et les pâles	Locale	Mortalité d'oiseaux et chauve-souris.	Garthe and Hüppop, 2004
Effet barrière : évitement, exclusion	Régionale	Effets comportementaux : Modification des voies de migration, réduction des aires d'alimentation, suppression de haltes migratoires. Accroissement des dépenses énergétiques et des risques de mortalité indirectes. Dépenses énergétique accrues des espèces migratrices de poissons, d'oiseaux et de mammifères marins qui cherchent à éviter les fermes sur une longue distance (jusqu'à 3 km).	Voir synthèse in CNPN, 2021 Peschko <i>et al.</i> , 2020 Vilela <i>et al.</i> , 2021 Soudijn <i>et al.</i> , 2022 Garthe <i>et al.</i> , 2023 Schwemmer <i>et al.</i> , 2023
Effet récif : nouveaux supports de colonisation et nouveaux habitats favorables aux	Locale	Affecte l'ensemble du réseau trophique : changements dans la structure des communautés, évolution vers un écosystème plus complexe avec augmentation de la diversité et de la biomasse des	Lange <i>et al.</i> , 2010, Dannheim <i>et al.</i> , 2020, Degraer <i>et al.</i> , 2019, Petersen and Malm, 2006, Lindeboom <i>et al.</i> ,

espèces à substrat dur		bivalves filtreurs et des poissons pélagiques, agrégation des grands prédateurs et prédation accrue. Effet de tremplin pour les espèces de substrat dur non indigènes peut également être observé.	2011, Raoux <i>et al.</i>, 2017 , Glarou <i>et al.</i>, 2020 , Mavraki, 2020 , Burkhard and Gee, 2012 , Mangi, 2013
Effet réserve dû à la limitation de la pêche	Zone tampon	Effet positif pour les espèces cibles des pêcheries avec, à long terme, un effet d'entraînement écologique avec augmentation de la biomasse piscicole autour du parc.	Busch <i>et al.</i>, 2011 , Glarou <i>et al.</i>, 2020 , Lange <i>et al.</i>, 2010 , Lindeboom <i>et al.</i>, 2011 , Mangi, 2013 , Petersen and Malm, 2006
Changement des habitats fonctionnels	Locale et zone tampon	Impacts sur certaines espèces de substrat meuble (endofaune, certains producteurs primaires) et certains oiseaux plongeurs et de surface.	Burkhard and Gee, 2012 , Degraer <i>et al.</i>, 2019 , Lindeboom <i>et al.</i>, 2011
Pollutions sonores et vibrations dues aux rotations des pâles	Locale et régionale	Dérangement de certaines espèces de macroinvertébrés (crustacés), de poissons, de mammifères marins et d'oiseaux.	Dannheim <i>et al.</i>, 2020 , Lindeboom <i>et al.</i>, 2011 , Petersen and Malm, 2006
Pollutions lumineuses : lumières et ombres	Locale et régionale	Affectent certaines espèces de poissons, d'oiseaux et de chiroptères.	Garthe and Hüppop, 2004
Pollutions électromagnétiques	Locale et régionale	Changements de comportement, stress, perturbation de la migration et diminution de l'efficacité de la prédation.	Dannheim <i>et al.</i>, 2020 , Öhman <i>et al.</i>, 2007 , Petersen and Malm, 2006
Modifications hydrodynamiques : érosion, « tri des sédiments » entraînant une modification de la granulométrie du substrat, des changements de courants, de température et la remise en suspension des sédiments et des nutriments dans le sillage des éoliennes.	Régionale	Les producteurs primaires et les consommateurs peuvent être touchés de manière insignifiante.	Busch <i>et al.</i>, 2010 , Dannheim <i>et al.</i>, 2020 , Degraer <i>et al.</i>, 2019 , Lindeboom <i>et al.</i>, 2011
Émission d'éléments trace métalliques, principalement aluminium par les dispositifs anticorrosion	Régionale	Emissions a priori inférieures aux valeurs seuils de toxicité pour les espèces et la santé humaine.	Golding <i>et al.</i>, 2015 , Kirchgeorg <i>et al.</i>, 2018

Enrichissement en matières organiques et détritus comme conséquence indirecte de l'augmentation de l'abondance des bivalves. Le processus de décomposition peut libérer de petites quantités de sulfure d'hydrogène (H ₂ S)	Locale	Non spécifié	Dannheim <i>et al.</i> , 2020
---	--------	--------------	-------------------------------

Tableau 7 : Pressions étendue spatiale et impacts pendant la phase de fonctionnement
Adapté de Baulaz *et al.*, 2023

1.3. Impacts sur les services écosystémiques

Les services écosystémiques sont des avantages que l'homme retire des écosystèmes fonctionnels. Ils sont classés en quatre grandes catégories :

- les services de production de biomasse (le bois, l'alimentation, les fibres),
- les services culturels (les paysages, l'identité, le bien-être),
- les services de régulation (de la qualité de l'air, de l'eau, du changement climatique, des événements extrêmes, des pathogènes)
- et les services de support (la création d'habitats fonctionnels, la formation et la fertilité du sol, la pollinisation, les grands cycles des éléments chimiques etc.).

L'Ipbes, la plate-forme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques en cite 18 (voir tableau 8) et démontre que les activités humaines, en général, améliorent les services de production et culturels, mais dégradent fortement les services de régulation et de soutien.

Type de services	Service
Services de production	Energie
	Alimentation animale et humaine
	Matériaux (bois, coton)
	Ressources médicinales, biochimiques et génétiques
Services culturels	Apprentissage et inspiration
	Expériences physiques et psychologiques
	Soutien identitaire
Services de régulation	Régulation de la qualité de l'air
	Régulation du climat
	Régulation de l'acidification des océans
	Régulation de la qualité des eaux douces et côtières
	Régulation de la distribution quantitative, spatiale, temporelle des eaux douces
	Régulation des aléas et des événements extrêmes
	Régulation des organismes et processus biologiques nuisibles
Services de soutiens	Création et entretien d'habitats
	Formation, protection, décontamination des sols et des sédiments
	Pollinisation et dispersion des graines et autres propagules
	Maintien des options

Tableau 8 : Services écosystémiques (Ipbes, 2019)

En ce qui concerne l'activité de production d'énergie éolienne, l'impact sur les services peut être positif (création d'habitat, protection d'espaces, effet de nurserie et de fourniture de ressources halieutiques aux zones de pêche adjacentes aux parcs) ou négatif, en particulier sur les services culturels (altération du paysage). Notons que des impacts *a priori* positifs, peuvent ne pas être reconnus par les parties prenantes (effet nurserie par exemple), à l'inverse des impacts négatifs peuvent être fortement mis en avant sans réel étayage scientifique (par exemple le fait que les zones d'exclusion de pêche ont un fort impact sur l'activité de pêche).

Les experts consultés ont estimé que tous les services écosystémiques seraient concernés par les installations éoliennes entraînant des changements majeurs dans les fonctions de l'écosystème de production (hors production primaire), montrant de forts dommages aux interactions trophiques. Par exemple, une modification de la production secondaire ou de la diversité spécifique ou génétique peut entraîner un gain ou une perte de biomasse, incitant les bénéficiaires comme les pêcheurs à adapter leurs pratiques.

Dans le contexte éolien, le changement de régime de services écosystémiques est principalement causé par l'effet récif, qui développera à long terme un écosystème plus riche et plus complexe que l'écosystème de substrat meuble existant avant la construction. Il est connu que l'approvisionnement en services écosystémiques est positivement corrélé à la biodiversité. En conséquence, l'effet de récif profitera à l'offre des services écosystémiques de différentes manières :

- l'augmentation de l'abondance de certaines espèces de poissons et de prédateurs supérieurs bénéficiera à l'approvisionnement en services d'approvisionnement et de culture ;
- les services de régulation seront aussi favorisés par une amélioration de la fonctionnalité du système ;
- les modifications des compartiments biotiques entraînent de nombreux effets cumulatifs indirects « *top-down* » et « *bottom-up* », liés aux cascades trophiques. Le résultat de ces processus est le développement d'un réseau trophique dominé par des bivalves filtreurs (Mavraki *et al.*, 2020) qui sont des organismes clés jouant un rôle majeur dans la fourniture de nombreux services, par exemple en filtrant de grands volumes d'eau, en diminuant la turbidité et en accumulant des nutriments (Armoškaitė *et al.*, 2020).

Cependant, le déploiement de l'éolien en mer contribue aussi à une homogénéisation à grande échelle des écosystèmes marins et à une diminution de la diversité des traits fonctionnels dans ce milieu (Degraer *et al.*, 2019) avec des effets contrastés :

- ⇒ Une augmentation de l'approvisionnement de la plupart des services écosystémiques à l'échelle locale, mais un déclin des espèces spécialistes et souvent rares, qui est un enjeu mondial.
- ⇒ Une évolution de l'accès aux services d'approvisionnement et culturels liée à la capacité des différents bénéficiaires à adapter leurs pratiques. Ces modifications de pratiques peuvent entraîner trois types d'impacts indirects sur les territoires marins/côtiers :
 - une surexploitation des services (ex. surpêche ou surexploitation du littoral) en réponse à la relocalisation des bénéficiaires autour des parcs éoliens ;
 - des conflits d'usage résultant de l'exploitation d'un service au détriment d'un autre ;
 - une pression accrue sur les écosystèmes adjacents aux installations, qui peut modifier leur capacité à fournir des services à grande échelle.

Les chercheurs ont particulièrement mis en évidence que les services écosystémiques d'approvisionnement de pêche, de maintien de l'habitat et donc des services écosystémiques culturels sont les plus impactés en raison des changements dans les réseaux trophiques et les fonctions écosystémiques. Ces changements sont causés principalement par le changement de l'habitat fonctionnel, et les effets des récifs et des réserves pendant les phases de construction et d'exploitation des éoliennes.

Déterminer comment les changements dans la biodiversité ont un impact sur les processus et les fonctions est essentiel pour déterminer l'effet des parcs éoliens sur la fourniture des services écosystémiques associés.

1.3.1. Services de production de ressources halieutiques et pharmaceutiques

La pêche en particulier fournit des protéines animales qui constituent un service de production alimentaire important en France. L'exclusion des zones de pêche par les parcs éoliens entraîne des tensions importantes avec les pêcheurs. Une équipe de chercheurs français (Halouani *et al.* 2020) a quantifié l'effet de débordement qui pourrait atténuer l'impact négatif de la perte d'accès des activités de pêche, dans un scénario de fermeture simulée de la zone du parc éolien. La modélisation prévoit une augmentation des captures, jusqu'à 7 % à proximité du parc éolien et une légère augmentation de la proportion d'espèces de haut niveau trophique. Cependant, l'influence de ces effets de débordement est limitée dans l'espace et l'augmentation attendue de la biomasse et des captures est très localisée dans les zones autour des installations de parcs éoliens *offshores*. A l'échelle de la baie de Seine, une analyse plus approfondie des effets de débordement a révélé un schéma spatial et a suggéré que la mise en place d'une zone d'exclusion à l'intérieur du parc éolien *offshore* pourrait concentrer des prédateurs très mobiles.

C'est avec les acteurs de la pêche que les controverses sont les plus grandes et notamment autour de l'existence d'un effet d'émigration nette d'espèces de la réserve vers les zones adjacentes (avec augmentation de la biomasse d'espèces exploitables) appelé débordement ou entraînement écologique (Di Lorenzo *et al.*, 2020, Halouani *et al.*, 2020). Cet effet est bien documenté pour les aires protégées, mais reste à quantifier pour les réserves plus petites autour des parcs éoliens *offshore* où les activités humaines persistent et qui, perturbant la biodiversité, pourrait diminuer voire annuler cet effet de débordement.

La caractéristique de l'étude conduite par Baulaz et collaborateurs (2023) est aussi d'avoir considéré l'accès aux services écosystémiques (c'est à dire les processus qui permettent aux humains de bénéficier des services écosystémiques), comme un des impacts (positif ou négatif) possible, et de proposer une approche pour **identifier les chaînes causales identifiant les impacts** de l'éolien *offshore* sur la modification de l'offre et de la demande de services écosystémiques.

Les chercheurs définissent les impacts principaux des deux phases du cycle de vie des installations éoliennes, la construction et le fonctionnement :

- **Lors de la construction**, les effets résultent principalement du creusement et de l'écrasement du substrat qui conduit dans un premier temps à une perte de plus de 27 % des producteurs primaires et des groupes de consommateurs primaires ;
- **Pendant la production**, l'effet récif, l'effet réserve et le changement d'habitat fonctionnel sont les effets les plus importantes sur l'écosystème qui entraînent (1) une augmentation globale de l'abondance et de la diversité des poissons pélagiques au sein du parc et à proximité malgré une prédation accrue des prédateurs supérieurs, ce qui augmente les services pour les activités comme la pêche, l'aquaculture ou les industries pharmaceutiques et (2) une diminution de l'abondance et la diversité des poissons plats dues à la perte d'une partie de leur habitat de substrat meuble.

L'intensité des impacts sur le service de production de biomasse dépend de trois paramètres :

1. les espèces pêchées localement ;
2. la réglementation de l'activité de production d'énergie ;
3. l'intensité de l'effet d'entraînement écologique.

1.3.2. Services de régulation

Les principaux effets attendus sont un **impact sur les services de filtration de l'eau, de production et de recyclage des nutriments**. Ces processus seront réduits pendant la phase de construction, en raison du réarrangement du benthos (entraînant une remise en suspension des matériaux et des polluants et une augmentation de la turbidité), et de l'augmentation du taux de mortalité des organismes filtrants. Ils s'améliorent ensuite pendant la phase d'exploitation, avec une augmentation de l'abondance des bivalves filtrants, le groupe le plus touché. Enfin, ces processus peuvent aussi être affecté par deux menaces complémentaires, l'introduction d'espèces envahissantes ou toxiques, facilitée par l'effet récif et le transfert potentiel dans le réseau trophique des émissions de métaux, même si cette pression n'entraîne que 4 % de la modification du système.

1.3.3. Services de soutien, création d'habitat fonctionnels

Il y a également des **impacts négatifs liés à la perte d'habitat fonctionnels benthiques ou pélagiques** pour les espèces à substrat meuble (pendant la phase de construction à cause du creusement, de l'écrasement du substrat et du réarrangement du benthos) **ou positifs liés aux nouveaux habitats créés** (pendant la phase d'exploitation). L'installation est constituée de divers substrats (pilonnes, câbles etc.) durs qui ont des effets récifaux favorisant nurserie, reproduction, frayère, alimentation et refuge. Ces nouveaux habitats peuvent indirectement favoriser l'implantation d'espèces non indigènes. Les routes migratoires de certains prédateurs supérieurs peuvent également être fortement affectées (13 % et 31 % des impacts sont liés aux prédateurs supérieurs pendant la phase de construction et de production respectivement). L'avifaune est particulièrement sensible à ces changements : certaines espèces présentent des comportements d'évitement en mer du Nord (e.g. l'Eider à duvet, *Somateria mollissima*, le Fulmar boréal, *Fulmarus glacialis*), tandis que d'autres sont attirées vers la zone éolienne (e.g. le Grand cormoran *Phalacrocorax carbo*) et peuvent être par conséquent plus exposés aux collisions.

1.3.4. Services culturels

Plus de 21 % des impacts concernent l'approvisionnement des services culturels, car ils sont associés à presque toutes les fonctions écosystémiques. Pendant la construction, la mégafaune marine et l'avifaune, des « espèces charismatiques », évitent, la zone, ce qui a un impact négatif sur l'ornithologie et les activités d'observation. En revanche, pendant la phase d'exploitation, une plus grande production secondaire associée à une plus grande diversité spécifique et génétique favorisent les grands prédateurs d'intérêt patrimonial et des ressources halieutiques d'intérêt récréatif. En outre, la filtration accrue de l'eau (changements dans les cycles biogéochimiques et les fonctions de production et de recyclage des nutriments) contribue à un paysage marin plus clair et plus attrayant. Le couplage de ces différents effets augmentera la variété des espaces marins à usage récréatif potentiel, même si les fonctions paysagères font partie des fonctions les moins impactées.

1.3.5. Accès aux services et compromis

Les compromis entre services sont partiellement conditionnés par la capacité d'accès à ces services, mais également la qualité des services de régulation et de soutien qui permettent la résilience des écosystèmes aux pressions. En particulier, les changements dans les services de régulation affecteront l'offre de services d'approvisionnement et de services culturels. De même les modifications de valeurs sociales et les mutations associées reconfigurent profondément le fonctionnement des territoires marins-côtières conduisant potentiellement à des conflits entre activités humaines maritimes, via des considérations économiques, des évolutions réglementaires et socioculturelles. Ces impacts sociaux, économiques et culturels sont souvent négligés dans la sphère scientifique, mais ils déterminent l'acceptabilité locale et sont donc essentiels à considérer dans le cadre de l'aménagement de l'espace maritime.

Il existe quatre types de changement dans l'accès aux services qui entraîneront un gain ou une perte d'avantages (financiers ou non) pour les bénéficiaires : des changements dans les pratiques, dans l'usage, dans la biomasse, dans les valeurs socio-culturelles (voir figure 10).

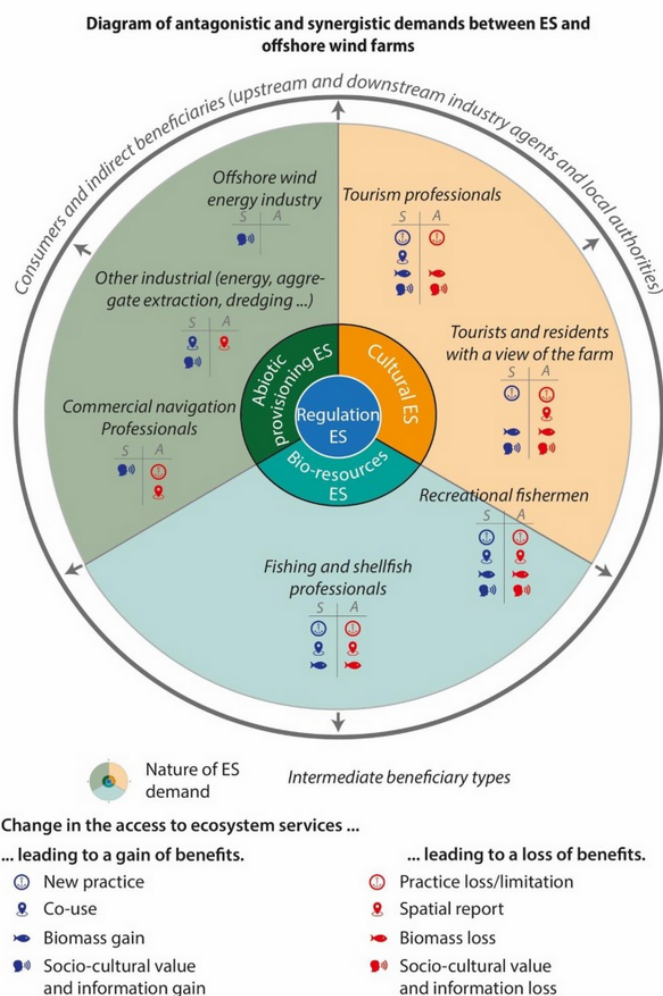


Figure 10 : Diagramme des compromis et synergies entre les demandes des usagers et les fermes éoliennes *offshore* extraite de Baulaz *et al.* 2023

L'accès aux services écosystémiques mobilise des pratiques, des outils, des équipements et des mobilités qui définissent l'accès matériel, mais aussi législatif, économique, de main-d'œuvre, de savoir, d'engagement ou d'investissement culturel, pour l'accès socioculturel aux services écosystémiques. L'accès aux services conditionne la nature et l'intensité de leur exploitation potentielle par les bénéficiaires et donc l'essentiel des pressions sur les écosystèmes et des conflits d'usages potentiels.

Plusieurs modifications des services écosystémiques se produisent *via* :

- **l'apparition de nouvelles pratiques** comme le tourisme marin et côtier de loisir, éducatif ou culturel ou la **diminution, voire disparition de pratiques existantes** en raison de la restriction de navigation, la limitation de la taille des bateaux, des types d'engins de pêche, l'accès restreint aux épaves et éléments patrimoniaux ;
- **une nouvelle spatialisation des activités** anciennes et nouvelles, liée aux nouveaux usages (par exemple le tourisme) ou des restrictions d'anciens usages (par exemple les zones d'exclusion de pêche) ou des reports d'usages ;
- **la modification de la biomasse** et de capacités d'accès à cette biomasse ;
- **la modification des valeurs sociales du milieu marin**, par exemple, une perte de certaines qualités essentielles de la mer, comme le sentiment de nature sauvage, les espaces ouverts ou

l'absence de structures ou à l'inverse, le développement d'une image de territoire développant les énergies renouvelables ;

- **es pertes ou gains de connaissances ou de compétences**, par exemple, pour la pêche.

Par conséquent, lorsque l'on considère l'ensemble des effets des installations éoliennes sur les territoires côtiers, il faut considérer les impacts indirects, relatifs aux adaptations de ces bénéficiaires. Ces impacts indirects sont des aspects sociaux de la durabilité qui sont souvent oubliés (Frederiksen *et al.*, 2021).

CHAPITRE 2 : RECOMMANDATION POUR LA GESTION ET LA PRISE DE DECISION

L'expansion progressive de l'éolien *offshore* pour répondre aux objectifs de production d'énergie, y compris des dispositifs flottants dans des zones plus profondes et plus lointaines, fait face à des problèmes techniques, économiques, sociaux et des préoccupations écologiques dans le monde entier. Plusieurs défis se posent alors :

- 1/ le partage de l'espace océanique entre les acteurs, qui doit être pris en compte afin d'éviter, ou du moins minimiser, les conflits.
- 2/ le développement d'outils d'évaluation des risques écologiques qui doivent être davantage intégrés dans les outils d'aide à la décision pour identifier les zones à forte biodiversité pour y éviter le déploiement d'infrastructures éoliennes *offshore*, mais aussi pour éclairer le processus de consentement (des méthodes innovantes peuvent être développées comme l'apprentissage automatique et les approches de modélisation, telles que les réseaux bayésiens).

Les impacts indirects sont moins souvent étudiés, ils doivent cependant également être considérés. Par exemple, l'augmentation des espèces de proies autour de ces installations (en particulier celles qui tolèrent la pression) augmentera la disponibilité de nourriture pour les niveaux trophiques supérieurs (par exemple, certaines espèces d'oiseaux et de mammifères), augmentant ainsi leur population alors même que d'autres espèces dans le même groupe taxonomique pourraient être affectées, par exemple par des collisions.

Deux équipes de recherche (Dannheim *et al.*, 2020, Degraer *et al.*, 2019), recommandent également de considérer quatre étendues spatiales distinctes pour analyser les impacts dus aux installations éoliennes en mer, les impacts relatifs à l'éolienne isolée, le parc éolien, la zone tampon et les impacts régionaux. Par ailleurs, les impacts devraient également être considérés le long d'un gradient de profondeur de la colonne d'eau.

L'intensité et la nature des impacts des installations éoliennes *offshores* varie en fonction de :

- la proximité ou non d'autres parcs éoliens, d'aires protégées, d'autres activités humaines de proximité, des stratégies de développement local ;
- de la perception des milieux naturels par les usagers de la mer et des régulateurs ;
- de l'adaptabilité des bénéficiaires de services aux impacts dus aux parcs éoliens ;
- des caractéristiques techniques et d'ingénierie des parcs (type de fondation, nombre d'éoliennes, taille et distance au rivage) ;
- de l'état de la biodiversité et des impacts synergiques potentiels d'autres pressions (Mouchet *et al.*, 2023).

Tous ces éléments doivent être pris en considération et articulés.

Les impacts peuvent aussi se propager loin de la zone d'exploitation lorsque les populations affectées migrent ; une réduction de leur nombre peut ainsi avoir des conséquences sur les écosystèmes de destination de ces animaux. Il est donc fondamental de considérer l'espace et la distribution temporelle des espèces les plus sensibles pour déterminer les risques associés à un projet donné. Néanmoins une telle approche nécessite un meilleur accès aux données de distribution et d'abondance d'espèces au cours des cycles annuels et sur les voies de migration des oiseaux, des poissons et des mammifères marins.

Par ailleurs, la recherche d'une absence de dommage environnementaux significatifs lors du développement des installations de production d'énergie *offshore* doit également être accompagné d'une évaluation de la compatibilité des nouveaux projets avec les cibles du cadre mondial pour la biodiversité, adopté en décembre 2022 à Montréal.

CIBLE 1 : Veiller à ce que toutes les zones fassent l'objet d'un aménagement du territoire participatif, intégré et inclusif en matière de biodiversité et/ou de processus de gestion efficaces portant sur le changement d'affectation des terres et de la mer, afin de ramener à près de zéro, d'ici à 2030, la perte de zones d'une grande importance en matière de biodiversité, y compris les écosystèmes d'une grande intégrité écologique, tout en respectant les droits des populations autochtones et des communautés locales.

La planification de l'espace marin, indispensable, doit intégrer les deux objectifs sous-jacents à cette première cible du cadre mondial, d'une part être le résultat d'un processus inclusif et participatif avec tous les usagers de la mer et du littoral, d'autre part être accompagnée d'un diagnostic sur la présence et l'état écologique des zones de grande importance en matière de biodiversité afin de stopper leur dégradation.

Le processus de concertation pour la planification de l'espace marin doit inclure tous les types d'usagers : les industriels, les pêcheurs, les touristes, les riverains, les scientifiques et les décideurs politiques. Des modalités d'intégration des générations futures et de la biodiversité dans le processus de planification doivent être mises en place. Le processus doit aboutir à un diagnostic partagé et transparent des usages prévus, des impacts de ces usages sur la biodiversité, sur les services écosystémiques, sur les accès aux ressources naturelles et aux services, sur les autres activités. Il doit intégrer des objectifs de partage juste et équitable des usages de la mer, des ressources biotiques et abiotiques et des services écosystémiques. Ce partage doit concerner également les impacts sociaux et environnementaux pour qu'ils ne soient pas subis par un groupe d'acteurs plutôt qu'un autre. Il doit être clairement reconnu que certains usagers ou la biodiversité peuvent pâtir de la restriction d'usage, de la perte de biodiversité ou de services écosystémiques, et des mécanismes de compensation doivent être mis en place.

Le diagnostic des zones de grand intérêt écologique doit permettre de définir des zones où l'implantation aura beaucoup d'impact pour envisager des restrictions d'implantation. Rappelons que l'évitement des impacts est obligatoire en tant que première phase de la séquence ERC (Eviter, réduire, compenser), bien qu'elle soit très rarement mise en œuvre de façon transparente et réelle.

CIBLE 2 : Faire en sorte que, d'ici à 2030, au moins 30 % des zones d'écosystèmes terrestres, d'eaux intérieures, côtiers et marins dégradés fassent l'objet d'une restauration effective, afin de renforcer la biodiversité et les fonctions et services écosystémiques, l'intégrité écologique et la connectivité.

Aujourd'hui, la prolifération des structures artificielles n'a pas pour objet de protéger ou de favoriser la biodiversité (plates-formes pétrolières et gazières, cages d'aquaculture, constructions de défense côtière et les installations d'énergie marine) et il y a un risque de manquer cette cible si elle n'est pas clairement identifiée dès le départ, ou alors d'entraîner des impacts non anticipés.

Or, les installations éoliennes *offshores*, bien que non conçues comme des récifs artificiels, ont des impacts souhaités et indésirables similaires (Degraer *et al.* 2020).

Une des questions ici, est de savoir comment ces installations peuvent participer à la restauration de la biodiversité. Comme décrit précédemment, leurs avantages environnementaux nets pour la biodiversité sont relativement clairs, leurs avantages sociaux sont encore débattus. Par exemple, est-ce que l'augmentation de la biomasse des poissons est équilibrée par rapport à la perte de zones de pêche ?

Or, pour renforcer les bénéfices il est nécessaire d'avoir une bonne compréhension des mécanismes à l'origine des impacts afin de concevoir des dispositifs bénéfiques à la biodiversité. Cette approche est par exemple obligatoire pour le développement de nouvelles installations aux Pays-Bas (Ministerie van Economische Zaken, 2019).

Il est ainsi possible de :

- Inscrire la restauration de la biodiversité comme un des objectifs prioritaires du projet, afin que la conception de l'installation ait un bénéfice net pour la biodiversité :
Exemples :
 - o Installer des hôtels à poissons ou autres structures complémentaires proches des turbines (Hermans *et al.*, 2020).

- Éviter l'implantation volontaire ou involontaire de structures dures disséminées au large des turbines pour éviter de contribuer à l'homogénéisation des océans (Firth *et al.*, 2020).
- Réfléchir à la taille du parc dans la même logique de ne pas transformer trop massivement la zone d'emprise.
- Privilégier l'éco-conception et les solutions fondées sur la nature : Exemple : les couches de protection contre l'affouillement pour améliorer l'habitat des poissons ou restaurer les parcs à huîtres (Glarou *et al.*, 2020).

CIBLE 3 : Faire en sorte et permettre que, d'ici à 2030, au moins 30 % des zones terrestres, des eaux intérieures et des zones côtières et marines, en particulier les zones revêtant une importance particulière pour la biodiversité et les fonctions et services écosystémiques, soient effectivement conservées et gérées par le biais de systèmes d'aires protégées écologiquement représentatifs, bien reliés et gérés de manière équitable, et d'autres mesures efficaces de conservation par zone, en reconnaissant les territoires autochtones et traditionnels, le cas échéant, et intégrés dans des paysages terrestres, marins et océaniques plus vastes, tout en veillant à ce que toute utilisation durable, le cas échéant dans ces zones, soit pleinement compatible avec les résultats de la conservation, en reconnaissant et en respectant les droits des peuples autochtones et des communautés locales, y compris sur leurs territoires traditionnels.

De la même façon que pour la seconde cible, la question ici est de dimensionner, concevoir les parcs éoliens pour qu'ils puissent jouer un rôle en tant qu'« autres mesures efficaces de conservation par zone ». L'exclusion de la pêche des parcs éoliens est une opportunité de réduire la pression principale s'exerçant sur la biodiversité marine (Ipbès, 2019). Le bénéfice de cette exclusion de pêche serait d'avoir un « effet réserve », c'est à dire une zone refuge favorisant la reproduction de la biodiversité et sa survie, comme ce qui est observé dans les aires en protection forte. Néanmoins, nous manquons d'études pour évaluer complètement l'effet réserve pour deux raisons, d'une part les zones concernées peuvent être de trop petite taille (or aucune donnée n'est actuellement disponible sur une taille minimale induisant plus d'effet positifs que d'effet négatif), et d'autre part, les autres activités humaines, en particulier celles liées à l'exploitation éolienne persistent. Par ailleurs, en contexte de tension sur l'aménagement (cible 1), il peut être plus favorable à la biodiversité de construire des zones multi activités, en particulier pêche, aquaculture, production d'énergie, afin de pouvoir préserver des zones en protection forte excluant les activités les plus impactantes (Claudet *et al.* Année ?). Deux trajectoires se dessinent ici, ces trajectoires doivent être discutées dans les processus de concertation visés par la cible 1.

Il est ainsi possible de :

- Soit d'inscrire l'effet réserve comme un des objectifs prioritaires du projet, afin que la conception de l'installation ait un bénéfice net pour la biodiversité et dans ce cas, diminuer les pressions humaines telle que la pollution (sonore, lumineuse, électromagnétique) qui peuvent réduire, voire annuler l'effet réserve pour certaines espèces.
- Soit partager l'espace avec d'autres activités en vue de préserver, par ailleurs, des zones en protection fortes dans lesquelles des actions de restauration peuvent être mise en œuvre si besoin.
- Financer des études ou des projets de recherche pour mieux quantifier l'effet réserve (voir cible 21).

CIBLE 4 : Assurer des actions de gestion urgentes, pour mettre un terme à l'extinction d'origine humaine d'espèces menacées connues, pour favoriser la reconstitution et la conservation des espèces, en particulier des espèces menacées, pour réduire considérablement le risque d'extinction, ainsi que pour maintenir et restaurer la diversité génétique au sein des populations d'espèces indigènes, sauvages et domestiquées et entre elles, afin de préserver leur potentiel d'adaptation, notamment par des pratiques de conservation et de gestion durable in situ et ex situ, et gérer efficacement les interactions entre l'homme et la faune sauvage afin de réduire au minimum les conflits entre l'homme et la faune sauvage en vue de leur coexistence.

Les installations éoliennes pouvant accueillir des espèces rares, plus ou moins menacées il est possible de :

- Diminuer les pressions humaines particulièrement impactantes pour les espèces rares ou menacées ciblées.
- Participer à l'acquisition de connaissances sur les espèces rares et menacées susceptibles d'être hébergées par les parcs ou dans le périmètre des installations (suivis des espèces, projets de recherche, études) et financer des études pour mieux comprendre leur biologie.
- Participer à des études de suivi des espèces rares ou menacées.

CIBLE 5 : Veiller à ce que l'utilisation, la récolte et le commerce des espèces sauvages soient durables, sûrs et légaux, en prévenant la surexploitation, en minimisant les impacts sur les espèces non ciblées et les écosystèmes, et en réduisant le risque de propagation d'agents pathogènes, en appliquant l'approche écosystémique, tout en respectant et en protégeant l'utilisation durable coutumière par les peuples autochtones et les communautés locales.

Non concerné.

CIBLE 6 : Éliminer, minimiser, réduire et/ou atténuer les impacts des espèces exotiques envahissantes sur la biodiversité et les services écosystémiques en identifiant et en gérant les voies d'introduction des espèces exotiques, en prévenant l'introduction et l'établissement des espèces exotiques envahissantes prioritaires, en réduisant les taux d'introduction et d'établissement d'autres espèces exotiques envahissantes connues ou potentielles d'au moins 50 % d'ici à 2030, en éradiquant ou en contrôlant les espèces exotiques envahissantes, en particulier dans les sites prioritaires, tels que les îles.

Les parcs éoliens *offshore* et les installations éoliennes pouvant favoriser certaines espèces exotiques envahissantes, il est possible de :

- Réduire les milieux attractifs pour ces espèces, lorsqu'ils sont connus.
- Mettre en œuvre des actions pour favoriser la plus grande diversité possible : en effet, les espèces exotiques envahissantes peuvent être favorisées par les milieux dégradés, pauvres en biodiversité ou être plus tolérantes à certaines pressions ;
- Restaurer les milieux et réduire les pressions anthropiques pour accueillir un plus grand nombre d'espèces y compris de potentiels prédateurs.
- Participer ou financer des suivis des espèces exotiques envahissantes sur les zones d'implantation des installations éoliennes.

CIBLE 7 : Réduire les risques de pollution et l'impact négatif de la pollution de toutes sources, d'ici à 2030, à des niveaux qui ne sont pas nuisibles à la biodiversité et aux fonctions et services des écosystèmes, en tenant compte des effets cumulatifs, notamment en réduisant de moitié au moins l'excès de nutriments perdus dans l'environnement, y compris par un cycle et une utilisation plus efficaces des nutriments ; en réduisant de moitié au moins le risque global lié aux pesticides et aux produits chimiques hautement dangereux, y compris par la lutte intégrée contre les ravageurs, fondée sur des données scientifiques, en tenant compte de la sécurité alimentaire et des moyens de subsistance ; et également en prévenant, en réduisant et en s'efforçant d'éliminer la pollution plastique.

Les risques de pollutions impactant la biodiversité et induites par les parcs et installations éoliennes *offshore* sont en particulier sonores, lumineuses, électromagnétiques. Il existe aussi quelques émissions de polluants comme les métaux lourds ou de la remise en suspension de polluants contenus dans les sédiments pendant la phase d'installation. Pour toutes ces pressions, les gestionnaires doivent :

- Réaliser un diagnostic pour chaque installation, car elles dépendent du type, de la taille, de la surface de l'installation ou du parc éolien.
- Proposer des plans de réduction de ces pressions et des risques associés après leur identification et leur évaluation pour être conforme à la cible 7 du cadre mondial sur la biodiversité.

CIBLE 8 : Réduire au minimum l'impact du changement climatique et de l'acidification des océans sur la biodiversité et accroître sa résilience par des mesures d'atténuation, d'adaptation et de réduction des risques de catastrophe, notamment par des solutions

fondées sur la nature et/ou des approches écosystémiques, tout en réduisant au minimum les effets négatifs et en favorisant les effets positifs de l'action climatique sur la biodiversité.

Les énergies renouvelables sont par nature favorable à l'atténuation du changement climatique. Néanmoins, avant tout projet, il faut définir précisément quelle substitution énergétique sera effective grâce au projet. S'il s'agit juste de produire plus d'énergie, pour de nouveaux usages, ou pour conserver des usages non durables, il peut être collectivement plus avantageux de revoir le projet pour éviter les externalités.

CIBLE 9 : Veiller à ce que la gestion et l'utilisation des espèces sauvages soient durables, procurant ainsi des avantages sociaux, économiques et environnementaux aux populations, en particulier à celles qui se trouvent dans des situations vulnérables et à celles qui dépendent le plus de la biodiversité, notamment par le biais d'activités durables fondées sur la biodiversité, de produits et de services qui améliorent la biodiversité, et en protégeant et en encourageant l'utilisation durable coutumière par les populations autochtones et les communautés locales.

Non concerné

CIBLE 10 : Veiller à ce que les superficies consacrées à l'agriculture, à l'aquaculture, à la pêche et à la sylviculture soient gérées de manière durable, notamment par l'utilisation durable de la biodiversité, y compris par une augmentation substantielle de l'application de pratiques respectueuses de la biodiversité, telles que l'intensification durable, l'agroécologie et d'autres approches innovantes contribuant à la résilience et à l'efficacité et la productivité à long terme de ces systèmes de production et à la sécurité alimentaire, la conservation et la restauration de la biodiversité et le maintien des contributions de la nature aux populations, y compris les fonctions et services écosystémiques.

Non concerné.

CIBLE 11 : Restaurer, maintenir et améliorer les contributions de la nature aux populations, y compris les fonctions et les services écosystémiques, tels que la régulation de l'air, de l'eau et du climat, la santé des sols, la pollinisation et la réduction des risques de maladie, ainsi que la protection contre les risques et les catastrophes naturelles, grâce à des solutions fondées sur la nature et/ou des approches fondées sur les écosystèmes, dans l'intérêt de toutes les personnes et de la nature.

Le diagnostic de l'état des écosystèmes marins et côtiers doit évoluer pour passer d'une vision statique (nombre d'espèces avant et après l'installation), à une vision dynamique prenant en compte les composantes écosystémiques et sociétales des territoires côtiers.

L'approche par les services écosystémiques est efficace pour avoir une vision plus globale des impacts des énergies marines renouvelables sur la biodiversité. Elle permet de comprendre les liens de causalité entre les activités humaines, les pressions, les conséquences sur les fonctions et sur les services (Boehlert et Gill, 2010, Shadman *et al.*, 2021). Le cadre de l'Ipbes (18 services écosystémiques présenté dans le tableau 6), permet de n'oublier aucun service majeur et de réaliser une évaluation de leur état avant et après la mise en fonctionnement.

Les porteurs de projets et gestionnaires doivent ainsi :

- Identifier les paramètres environnementaux et socio-économiques permettant de surveiller les impacts globaux des installations et parc éolien *offshore*, afin d'anticiper les éventuels conflits entre les activités humaines.
- Identifier les impacts écologiques cumulés et les compromis entre les services écosystémiques et les variables modifiant leur dynamique.
- Mettre en place des mesures pour réduire les impacts sur les services écosystémiques et donc faciliter l'intégration de ces nouveaux usages de la mer aux côtés des usages existants.

CIBLE 12 : Accroître sensiblement la superficie, la qualité et la connectivité des espaces verts et bleus dans les zones urbaines et densément peuplées, ainsi que l'accès à ces espaces et les avantages qu'ils procurent de manière durable, en intégrant la

conservation et l'utilisation durable de la biodiversité et en garantissant une planification urbaine intégrant la biodiversité, en renforçant la biodiversité indigène, la connectivité et l'intégrité écologiques, en améliorant la santé et le bien-être de l'homme et son lien avec la nature, et en contribuant à une urbanisation inclusive et durable et à la fourniture de fonctions et de services écosystémiques.

Non concerné.

CIBLE 13 : Prendre des mesures juridiques, politiques, administratives et de renforcement des capacités efficaces à tous les niveaux, selon qu'il conviendra, pour assurer le partage juste et équitable des avantages découlant de l'utilisation des ressources génétiques et des informations de séquençage numérique sur les ressources génétiques, ainsi que des connaissances traditionnelles associées aux ressources génétiques, et faciliter un accès approprié aux ressources génétiques, et d'ici à 2030, faciliter une augmentation significative des avantages partagés, conformément aux instruments internationaux applicables en matière d'accès et de partage des avantages.

Non concerné.

CIBLE 14 : Assurer la pleine intégration de la biodiversité et de ses multiples valeurs dans les politiques, les réglementations, les processus de planification et de développement, les stratégies d'éradication de la pauvreté, les évaluations environnementales stratégiques, les études d'impact sur l'environnement et, le cas échéant, la comptabilité nationale, à tous les niveaux de gouvernement et dans tous les secteurs, en particulier ceux qui ont des incidences importantes sur la biodiversité, en alignant progressivement toutes les activités publiques et privées, les flux fiscaux et financiers pertinents sur les buts et objectifs du présent cadre.

Pour améliorer les études d'impacts des activités éoliennes sur la biodiversité, plusieurs aspects doivent être renforcés :

- Respecter le triptyque éviter, réduire, compenser, en particulier l'évitement et la réduction.
- Mieux intégrer la connaissance scientifique disponible en amont des projets et de leur évaluation d'impact. En particulier les connaissances sur les groupes d'espèces moins étudiées, comme les poissons, les invertébrés, ou les connaissances sur les dynamiques écosystémiques.
- Définir des actions correctives basées sur la connaissance scientifique, pour diminuer les impacts sur la biodiversité.

Une équipe française (Brignon *et al.* 2022) propose une méthode pour évaluer tous les impacts, sans en oublier. Ils proposent de combiner des consultations d'experts, de la recherche de consensus et un système de notation, afin de hiérarchiser les paires de pressions et de récepteurs de l'environnement marin sur lesquels travailler. Le système de notation est basé sur l'importance écologique des récepteurs, le degré de connaissance de l'effet d'une pression sur un récepteur et la sensibilité de chaque récepteur aux pressions.

Un autre point d'incertitude est le choix des espèces qui permettent de suivre les impacts et leur réduction. En effet, il n'est pas possible de suivre toutes les espèces migratrices potentiellement concernées par les impacts. Un choix, ou une hiérarchisation est nécessaire. Marc Desholm, un chercheur danois propose un indicateur pour identifier les espèces migratrices les plus sensibles aux collisions dans des zones étendues avec plusieurs parcs éoliens (par exemple, la mer du Nord ou l'est ou l'ouest de l'Amérique du Nord) ou pour traiter d'autres questions de risque (par exemple, une mortalité élevée due à la chasse, aux collisions avec les oiseaux, aux torchères sur les plates-formes pétrolières ou aux collisions avec d'autres structures élevées). Mais Cet indicateur ne prend pas en compte les impacts hors collisions que les éoliennes font peser sur les oiseaux (par exemple le déplacement et la modification de l'habitat).

L'approche, mise au point sur 38 espèces et testée sur le parc éolien *offshore* de Nysted, situé dans l'un des principaux goulets d'étranglement de la migration aviaire en mer Baltique, est basé sur des sous indicateurs : l'abondance relative des individus de l'espèce et la sensibilité démographique (survie et fécondité). Ces deux indicateurs semblent efficaces et opérationnels, car ils prennent en compte les caractéristiques connues des dynamiques de populations et des abondances relatives des différentes espèces sur le site de migration. Ensuite, les deux indicateurs peuvent s'adapter au niveau d'informations

disponibles (par exemple : une seule une liste d'espèces est disponible, ou alors le nombre d'individus d'une espèce migrant annuellement est connu ainsi que leurs réactions d'évitement et d'attraction). Enfin, les deux indicateurs sont peu nombreux et indépendants ce qui simplifie l'approche. Cependant, aucun des deux indicateurs n'a été relié jusqu'à présent à des taux de mortalité estimés, et encore moins à des impacts au niveau de la population.

CIBLE 15 : Prendre des mesures juridiques, administratives ou de politique générale visant à inciter les entreprises à agir et à leur donner les moyens de le faire, notamment en veillant à ce que les grandes entreprises et les entreprises transnationales, ainsi que les institutions financières : a) Contrôlent, évaluent et communiquent régulièrement et de manière transparente leurs risques, dépendances et incidences sur la biodiversité, y compris en prévoyant des dispositions applicables à toutes les grandes entreprises ainsi qu'aux entreprises transnationales et aux institutions financières concernant leurs opérations, leurs chaînes d'approvisionnement et de valeur, ainsi que leurs portefeuilles ; b) Informent les consommateurs en vue de promouvoir des modes de consommation durables ; c) Rendent compte du respect des dispositions et mesures relatives à l'accès et au partage des avantages, en tant que de besoin ; afin de réduire progressivement les incidences négatives sur la biodiversité, d'accroître les incidences positives, de réduire les risques liés à la biodiversité pour les entreprises et les institutions financières, et de promouvoir des mesures propres à garantir des modes de production durables.

Évaluer les impacts sur l'ensemble de la chaîne de valeur. Travailler sur une approche systémique :

- S'assurer que les impacts sur toutes les dimensions de la biodiversité (espèces, habitats : composition, structure et fonction de l'écosystème soient évités ou réduits et qu'ils ne compromettent pas sa robustesse, sa résilience et sa capacité à fournir des biens et des services.
- S'appuyer sur les meilleures connaissances disponibles pour aider à anticiper les impacts écologiques et sociaux et choisir les implantations, processus, solutions préservant à la fois le potentiel d'atténuation des gaz à effets de serre, les autres activités humaines et les écosystèmes marins.
- Utiliser des approches intégratives pour recueillir des informations pertinentes permettant d'avoir une vision globale des impacts positifs et négatifs, et des compromis entre différentes options de gestion.

Contrôler les impacts des installations :

- Participer à la création de connaissance scientifique en assurant des suivis de la biodiversité et en rendant les données collectées disponibles à la recherche.
- En respectant le triptyque éviter, réduire, compenser, en particulier l'évitement et la réduction.
- Par des suivis réguliers sur site, permettant de comprendre quels sont les impacts sur la biodiversité.
- Par des mises à jour des processus en fonction des nouvelles connaissances disponibles sur les impacts et les risques.

Informier régulièrement sur les risques liés aux options de gestions choisies. Être transparent sur les compromis entre les différentes options de gestion, les choix qui ont été faits dans le cadre de l'installation (taille de l'implantation, matériaux utilisés, gestion des déchets, gestion des impacts sur la biodiversité, impacts sur les services écosystémiques et sur les autres activités humaines et processus de compensation éventuels).

CIBLE 16 : Encourager les populations à faire des choix de consommation durables et à leur donner les moyens de le faire, notamment en créant des cadres politiques, législatifs ou réglementaires propices, en améliorant l'éducation ainsi que l'accès à des informations pertinentes et précises et à des solutions de substitution, et, d'ici à 2030, réduire l'empreinte mondiale de la consommation de manière équitable, notamment en réduisant de moitié le gaspillage alimentaire mondial, en limitant significativement la surconsommation et en diminuant considérablement la production de déchets, de manière à permettre à tous de vivre agréablement en harmonie avec la Terre nourricière.

Il est possible de :

- Être transparent sur la participation du projet à l'empreinte écologique française.

- Être acteurs des campagnes pour lutter contre la surconsommation électrique.
- Participer au financement de recherches pour mieux caractériser la dépendance des humains à la biodiversité et les risques liés à la perte de services écosystémiques.

CIBLE 17 : Établir, renforcer les capacités et mettre en œuvre dans tous les pays les mesures de biosécurité prévues à l'article 8 g), de la Convention sur la diversité biologique, ainsi que les mesures relatives à la manipulation des biotechnologies et à la répartition de ses avantages prévues à l'article 19 de la Convention.

Non concerné.

CIBLE 18 : Identifier d'ici à 2025, et éliminer, supprimer ou réformer les incitations, y compris les subventions néfastes pour la biodiversité, d'une manière proportionnée, juste, équitable et efficace, tout en les réduisant substantiellement et progressivement d'au moins 500 milliards de dollars des États-Unis par an d'ici à 2030, en commençant par les incitations les plus néfastes, et renforcer les incitations positives pour la conservation et l'utilisation durable de la biodiversité.

Non concerné.

CIBLE 19 : Augmenter substantiellement et progressivement le niveau des ressources financières provenant de toutes les sources, de manière efficace, opportune et facilement accessible, y compris les ressources nationales, internationales, publiques et privées, conformément à l'article 20 de la Convention, pour mettre en œuvre les stratégies et plans d'action nationaux pour la biodiversité, en mobilisant d'ici à 2030 au moins 200 milliards de dollars US par an, notamment en : a) augmentant le total des ressources financières internationales liées à la biodiversité provenant des pays développés, y compris l'aide publique au développement, et des pays qui assument volontairement les obligations des pays développés Parties, vers les pays en développement, en particulier les pays les moins avancés et les petits États insulaires en développement, ainsi que les pays à économie en transition, pour atteindre au moins 20 milliards de dollars par an d'ici à 2025, et au moins 30 milliards de dollars par an d'ici à 2030 b) augmentant de manière significative la mobilisation des ressources nationales, facilitée par la préparation et la mise en œuvre de plans nationaux de financement de la biodiversité ou d'instruments similaires, selon les besoins, les priorités et les circonstances d'ordre national. c) tirant parti des financements privés, promouvant les financements mixtes, en mettant en œuvre des stratégies pour lever des ressources nouvelles et supplémentaires, et encourageant le secteur privé à investir dans la biodiversité, notamment par le biais de fonds d'impact et d'autres instruments d) stimulant les systèmes innovants tels que le paiement des services écosystémiques, les obligations vertes, les compensations et les crédits de biodiversité, les mécanismes de partage des bénéfices, par des garanties environnementales et sociales ; e) optimisant les retombées positives et les synergies des financements ciblant la biodiversité et les crises climatiques ; f) renforçant le rôle des actions collectives, notamment celles des populations autochtones et des communautés locales, des actions centrées sur la Terre nourricière et des approches non fondées sur le marché, y compris la gestion communautaire des ressources naturelles et la coopération et la solidarité de la société civile, en vue de la conservation de la biodiversité ; g) améliorant l'efficacité, l'efficacité et la transparence de la fourniture et de l'utilisation des ressources.

Non concerné.

CIBLE 20 : Renforcer la création et le développement des capacités, l'accès aux technologies et leur transfert, et promouvoir le développement et l'accès à l'innovation et à la coopération technique et scientifique, notamment par le biais de la coopération Sud-Sud, Nord-Sud et triangulaire, afin de répondre aux besoins d'une mise en œuvre efficace, en particulier dans les pays en développement, en favorisant le développement conjoint de technologies et les programmes conjoints de recherche scientifique pour la conservation et l'utilisation durable de la biodiversité et en renforçant les capacités de recherche scientifique et de surveillance, à la mesure de l'ambition des buts et objectifs du cadre.

Non concerné.

CIBLE 21 : Veiller à ce que les meilleures données, informations et connaissances disponibles soient accessibles aux décideurs, aux praticiens et au public afin de guider une gouvernance efficace et équitable, une gestion intégrée et participative de la biodiversité, et de renforcer la communication, la sensibilisation, l'éducation, la surveillance, la recherche et la gestion des connaissances ; dans ce contexte également, les connaissances, innovations, pratiques et technologies traditionnelles des peuples autochtones et des

communautés locales ne devraient être accessibles qu'avec leur consentement préalable, donné librement et en connaissance de cause, conformément à la législation nationale.

La recherche scientifique peut permettre d'améliorer :

- les connaissances sur les impacts des installations éoliennes sur la biodiversité ;
- les études d'impacts ;
- les connaissances sur la biodiversité :
 - o Quel effet d'émigration nette d'espèces de la réserve vers les zones adjacentes (débordement écologique) ?
 - o Quel potentiel de nurserie et d'augmentation de biomasse des espèces exploitables ?
 - o Quelle est la part de déplacement opportuniste d'espèces (sans augmentation du nombre d'individus) et la part d'augmentation des populations favorisées par le nouveau milieu créé et l'absence de pression de pêche ?
 - o Quels éléments permettraient d'éviter les conflits d'usages, notamment avec les pêcheurs ?

CIBLE 22 : Assurer la représentation et la participation pleines et entières, équitables, inclusives, effectives et sensibles au genre dans la prise de décision, ainsi que l'accès à la justice et aux informations relatives à la biodiversité par les peuples autochtones et les communautés locales, en respectant leurs cultures et leurs droits sur les terres, les territoires, les ressources et les connaissances traditionnelles, ainsi que par les femmes et les filles, les enfants et les jeunes, et les personnes handicapées, et assurer la pleine protection des défenseurs des droits de l'homme en matière d'environnement.

CIBLE 23 : Assurer l'égalité des sexes dans la mise en œuvre du cadre grâce à une approche sensible au genre où toutes les femmes et les filles ont des chances et des capacités égales de contribuer aux trois objectifs de la Convention, notamment en reconnaissant l'égalité de leurs droits et de leur accès aux terres et aux ressources naturelles et leur participation et leur leadership complets, équitables, significatifs et informés à tous les niveaux d'action, d'engagement, de politique et de prise de décision liés à la biodiversité.

La concertation avec tous les groupes sociaux est importante pour l'acceptabilité des projets éoliens *offshore*. Les décideurs et aménageurs doivent tenir compte de l'impact des parcs, y compris en termes de perte de services écosystémiques pesant sur la société ou les autres activités humaines, lors du choix de la localisation et de l'étendue spatiale de ces exploitations (Hastik *et al.*, 2015).

Autant que possible, il convient également de s'assurer que les installations ne porteront pas préjudice aux générations futures ou à la biodiversité, dans leur accès aux territoires marins et aux ressources biologiques.

ANNEXE 1 : LACUNES DE CONNAISSANCES SUR LES IMPACTS DES INSTALLATIONS EOLIENNES *OFFSHORE*

La production d'électricité à partir de l'énergie éolienne a connu une croissance exponentielle dans le monde au cours de la dernière décennie, bénéficiant du contexte géopolitique (changement climatique, désir de résilience et de diminuer la dépendance, et hausses des prix de l'énergie), des avancées technologiques, de la baisse des coûts de production et des fortes subventions des États et des investisseurs. Par ailleurs, le coût moyen actualisé de l'énergie (une baisse de près de 55 % est prévue à partir de 2018 à 2030), et des baisses des coûts de production d'ici à 2050 (de 37 % à 49 %), rend le secteur de l'éolien *offshore* de plus en plus compétitif avec des combustibles fossiles.

Les parcs éoliens *offshore* représentaient déjà 10 % des nouvelles installations éoliennes dans le monde en 2019 (dont près de 80 % en Europe), et devraient contribuer à plus de 20 % de capacité de production d'électricité d'ici 2025. Pour atteindre ce taux de croissance, la capacité mondiale doit être multipliée par près de 10 d'ici 2030 (à 228 GW) et continuer à augmenter pour atteindre 1000 GW d'ici 2050.

Pour atteindre ces objectifs, les experts prédisent que d'ici 2035, 11 à 25 % de tous les nouveaux projets *offshores* dans le monde comprendront des fondations flottantes.

Les objectifs en Europe sont encore plus ambitieux avec la publication de l'*European Offshore Renewable Energy Strategy* dans le cadre du *Green Deal* qui a pour ambition de positionner l'Union européenne en tant qu'acteur mondial *leader* de ces technologies pour couvrir au moins 50 % du mix énergétique en 2050 et 30 % de la demande future d'électricité en Europe.

Pour contribuer à l'objectif de neutralité climatique de l'Union, entre 240 et 450 GW de production éolienne *offshore*, des augmentations de capacités sont encore nécessaires d'ici 2050.

Cependant, ce développement s'effectue alors qu'il existe encore des lacunes considérables dans la connaissance sur les impacts écologiques des éoliennes. Nous manquons d'informations précises et quantifiées sur la plupart des impacts générés par les installations marine *offshore* : évitement local par la faune marine, impacts de la pollution lumineuse, impacts des champs électromagnétiques, impact de la libération d'éléments traces métalliques, impacts sur l'économie, l'emploi, le paysage et les valeurs socioculturelles associées au milieu marin. Il y a également une grande incertitude sur l'ensemble de ces impacts qui dépendent fortement du contexte.

Par ailleurs, il existe également des divergences scientifiques concernant l'ampleur des impacts des installations éoliennes *offshores*. De plus, la plupart des publications proviennent d'études menées à des échelles localisées et restreintes (par exemple, en eaux peu profondes, proche de la côte, avec peu de turbines, une faible capacité de production et occupant une petite surface). L'acquisition de nouvelles données de surveillance dédiées aux développements de ces installations est donc très pertinente pour combler les lacunes dans les connaissances scientifiques étant, à leur tour, d'une grande valeur pour les décideurs, les gestionnaires et l'industrie. Les processus de surveillance doivent se concentrer sur les pressions et les impacts sur des éléments spécifiques de l'écosystème (y compris les habitats et les espèces protégées et vulnérables) pour laquelle une plus grande incertitude a été identifiée.

Impacts sur les espèces tropicales et les habitats

Malgré le nombre relativement élevé d'espèces étudiées, il existe un biais historique en faveur des espèces à distribution nordique comme le Marsouin commun, *Phocoena phocoena*, le Phoque commun, *Phoca vitulina*, le Guillemot de Troïl, *Uria aalge* ou la morue, *Gadus morhua* (Galparsoro *et al.* 2020), et un nombre inférieur d'étude chez les invertébrés ou les espèces tropicales. Même si cela commence à changer (Lemos *et al.*, 2023), un effort de recherche doit être porté sur ces espèces, ainsi que sur les habitats, en particulier

dans un contexte de déploiement massif de ces installations au niveau mondial, y compris dans les zones tropicales.

Il existe un degré relativement élevé d'accord dans la littérature scientifique sur le type d'impact (positif, négatif) des dispositifs éoliens sur la biodiversité. En revanche, il reste de grandes lacunes de connaissance sur l'ampleur quantitative (mortalités par exemple) et qualitative de l'impact et les interactions entre les pressions des dispositifs éoliens *offshore* et la biodiversité, y compris les espèces, les habitats et la structure, les fonctions et processus des écosystèmes. Cette quantification est essentielle pour évaluer tous les risques écologiques associés aux installations éoliennes *offshores*.

Impacts des grandes installations ou des réseaux étendus comme les grandes fermes éoliennes *offshores*

Copping *et al.* (2020) affirment que plusieurs types d'impacts environnementaux des systèmes d'énergie marine sont suffisamment connus et évalués comme faibles en particuliers pour les installations isolées ou les petits réseaux : (1) Effets du bruit sous-marin généré par les installations sur les mammifères marins et les poissons ; (2) Champs électromagnétiques émis par les câbles électriques d'exportation sur certaines espèces marines ; (3) Modifications des habitats benthiques et pélagiques ; et (4) Modifications du mouvement de l'eau et des sédiments pendant l'exploitation.

Ces chercheurs préconisent de concentrer les efforts de recherche sur la compréhension et la prévention des impacts pour lesquels il reste un niveau élevé d'incertitude ou un manque de connaissance, en particulier le risque de collisions avec les parties mobiles des installations pour les animaux marins, et de focaliser sur les installations présentant le plus d'impacts, c'est-à-dire les grandes installations ou les grands champs d'éoliennes.

Impacts des pressions cumulées

Les activités humaines peuvent produire plusieurs pressions co-occurentes, qui peuvent entraîner des impacts cumulatifs, synergiques ou antagonistes sur l'écosystème. Il est urgent d'étudier les interactions multiples entre les activités humaines et les éléments de l'écosystème, étant donné que les développements futurs de l'énergie éolienne ajouteront aux impacts cumulatifs déjà produits par les activités existantes et le changement climatique. De plus, en raison de la demande accrue prévue d'espace marin, de multiples utilisations de l'océan sont susceptibles d'avoir lieu dans la même zone que la production d'énergie éolienne et une augmentation des pressions cumulatives locales est susceptible de se produire en exacerbant les impacts environnementaux dans un contexte d'anthropisation croissante du milieu marin (Vilela *et al.*, 2021).

Impact des variations de vent sur la biodiversité

Une équipe de chercheurs allemands (Akhtar *et al.* 2021) a estimé par ailleurs que la production d'électricité par l'éolien *offshore* en mer du nord pouvait être réduite de 20 % ou plus en raison des variations de vents induites par les parcs eux-mêmes affectant la productivité du parc en interne et celle des parcs voisins, augmentant les coûts et les pertes économiques. Plus largement, l'impact sur la biodiversité de ces variations locales de vent, en particulier les oiseaux marins, (migrateurs ou non) n'est pas connu. Or selon ces auteurs, le déficit annuel moyen de vitesse du vent au sein d'un parc éolien peut atteindre 2 à 2,5 m/s-1 selon la géométrie du parc éolien. Le déficit moyen diminue avec la distance, mais peut s'étendre sur 35 à 40 km sous le vent lors de vents dominants du sud-ouest. Ces déficits sont plus élevés au printemps (principalement de mars à avril) et plus faibles de novembre à décembre.

Impacts sur les services écosystémiques

Le nombre limité d'études portant sur les impacts sur les services écosystémiques doivent également être soulignés. Des analyses plus approfondies des effets des installations sur la fourniture de services écosystémiques mettra potentiellement en évidence des impacts affectant (positivement ou négativement) les autres secteurs maritimes opérant dans les zones environnantes.

Une équipe de recherche française (Baulaz *et al.*, 2023) a démontré que les impacts sont mal documentés pour certains compartiments trophiques, comme le zooplancton ou les consommateurs primaires (hors filtreurs) ; ou que certains résultats sont contradictoires (par exemple, certaines études rapportent à la fois un comportement d'évitement et d'attraction au sein du parc éolien pour certaines espèces d'oiseaux - Blew *et al.*, 2008, Skov *et al.*, 2018).

Impacts sur les grands cycles des nutriments

Alors que les études sur les effets de l'aquaculture de la moule bleue (*Mytilus edulis*) ont fourni des données sur l'élimination des particules (Cranford, 2019) et son effet sur les cycles des nutriments pélagiques et benthiques (Petersen *et al.*, 2019), des données similaires pour les autres espèces des parcs éoliens font défaut. Or, la disponibilité de telles données permettrait d'estimer l'empreinte biogéochimique d'un parc à l'échelle locale. De plus, une intégration plus poussée de ces données dans les modèles océanographiques pourrait permettre d'évaluer les changements associés à ces installations à une échelle géographique plus large.

Une autre lacune de connaissance est la façon dont les récifs artificiels affectent le flux de carbone à travers les réseaux trophiques localement modifiés. Les observations et la modélisation révèlent une abondance accrue de poissons (Reubens *et al.*, 2014) et de grands crustacés (Krone *et al.*, 2017) ainsi qu'une importance accrue d'un réseau trophique basé sur les détritiques. Cependant, la quantification du flux de carbone à travers le réseau trophique spécifique de ces installations fait défaut.

Impacts du changement climatique

Enfin, les récifs artificiels, comme les récifs naturels, sont soumis à un environnement marin plus chaud et acidifié. La combinaison de l'acidification et du réchauffement entraîne des changements substantiels, non additifs et complexes dans la dynamique des communautés (Queirós *et al.*, 2015), affecte le cycle des nutriments pélagiques et benthiques (Braeckman *et al.*, 2014) et modifie les interactions prédateurs/proies (Draper et Weissburg, 2019).

Enfin, il ne faut pas sous estimer l'écart entre la perception et la réalité des risques, découlant de l'incertitude ou du manque de données sur les impacts environnementaux réels des dispositifs énergétiques océaniques.

Il existe aussi un manque de données sur les implications et conséquences pour d'autres secteurs maritimes (par exemple, pêche, tourisme).

ANNEXE 2 : BIBLIOGRAPHIE

- Adams, T.P., R.G. Miller, D. Aleynik, and M.T. Burrows. 2014. Offshore marine renewable energy devices as stepping stones across biogeographical boundaries. *Journal of Applied Ecology* 51:330–338, <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12207>.
- Akhtar, N., Geyer, B., Rockel, B. *et al.* Accelerating deployment of offshore wind energy alter wind climate and reduce future power generation potentials. *Sci Rep* **11**, 11826 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-91283-3>
- Baulaz Y., Mouchet M., Niquil N, Ben Rais Lasram F., An integrated conceptual model to characterize the effects of offshore wind farms on ecosystem services, *Ecosystem Services*, Volume 60, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2023.101513>.
- Bennema, F.P., G.H. Engelhard, and H. Lindeboom. 2020. *Ostrea edulis* beds in the central North Sea: Delineation, ecology, and restoration. *ICES Journal of Marine Science*, fsaa134, <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsaa134>.
- Bergström, L., F. Sundqvist, and U. Bergström. 2013. Effects of an offshore wind farm on temporal and spatial patterns in the demersal fish community. *Marine Ecology Progress Series* 485:199–210, <https://doi.org/10.3354/meps10344>.
- Brabant, R., Laurent, Y., Poerink, B. J., & Degraer, S. (2021). The relation between migratory activity of pipistrellus bats at sea and weather conditions offers possibilities to reduce offshore wind farm effects. *Animals*, 11(12), 3457. <https://doi.org/10.3390/ani11123457>
- Braeckman, U., C. Van Colen, K. Guilini, D. Van Gansbeke, K. Soetaert, M. Vincx, and J. Vanaverbeke. 2014. Empirical evidence reveals seasonally dependent reduction in nitrification in coastal sediments subjected to near future ocean acidification. *PLoS ONE* 9(10):e108153, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0108153>.
- Brandt, M., A. Dragon, A. Diederichs, M. Bellmann, V. Wahl, W. Piper, J. Nabe-Nielsen, and G. Nehls. 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>.
- 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.
- Conseil national de la protection de la nature. Autosaisie du CNPN sur le développement de l'énergie offshore en France et ses impacts sur la biodiversité, le patrimoine naturel et les paysages. Séance du 06 juillet 2021
- Coppes, J., Braunisch, V., Bollmann, K. *et al.* The impact of wind energy facilities on grouse: a systematic review. *J Ornithol* **161**, 1–15 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10336-019-01696-1>
- Copping, A.E.; Freeman, M.C.; Gorton, A.M.; Hemery, L.G. Risk Retirement—Decreasing Uncertainty and Informing Consenting Processes for Marine Renewable Energy Development. *J. Mar. Sci. Eng.* **2020**, *8*, 172. <https://doi.org/10.3390/jmse8030172>
- Coolen, J.W.P., B. van der Weide, J. Cuperus, M. Blomberg, G.W.N.M. van Moorsel, M.A. Faasse, O.G. Bos, S. Degraer, and H.J. Lindeboom. 2020a. Benthic biodiversity on old platforms, young wind farms and rocky reefs. *ICES Journal of Marine Science* 77(3):1,250–1,265, <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsy092>.
- Cranford, P.J. 2019. Magnitude and extent of water clarification services provided by bivalve suspension feeding. Pp 119–141 in *Goods and Services of Marine Bivalves*. A. Smaal, J.G. Ferreira, J. Grant, J.K. Petersen, and Ø. Strand, eds, Springer International Publishing.
- Jennifer Dannheim, Lena Bergström, Silvana N R Birchenough, Radosław Brzana, Arjen R Boon, Joop W P Coolen, Jean-Claude Dauvin, Ilse De Mesel, Jozefien Derweduwen, Andrew B Gill, Zoë L Hutchison, Angus C Jackson, Urszula Janas, Georg Martin, Aurore Raoux, Jan Reubens, Liis Rostin, Jan Vanaverbeke, Thomas A Wilding, Dan Wilhelmsson, Steven Degraer, Benthic effects of offshore renewables: identification of knowledge gaps and urgently needed research, *ICES Journal of Marine Science*, Volume 77, Issue 3, May-June 2020, Pages 1092–1108, <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsz018>
- Dannheim, J., L. Bergström, S.N.R. Birchenough, R. Brzana, A.R. Boon, J.W.P. Coolen, J.C. Dauvin, I. De Mesel, J. Derweduwen, A.B. Gill, and others. 2020. Benthic effects of offshore renewables: Identification of knowledge gaps and urgently needed research. *ICES Journal of Marine Science* 77(3):1,092–1,108, <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsz018>.

Darwish, A. S., & Al-Dabbagh, R. (2020). Wind energy state of the art: present and future technology advancements. *Renewable Energy and Environmental Sustainability*, 5, 7.

Degraer, S., D.A. Carey, J.W.P. Coolen, Z.L. Hutchison, F. Kerckhof, B. Rumes, and J. Vanaverbeke. 2020. Offshore wind farm artificial reefs affect ecosystem structure and functioning: A synthesis. *Oceanography* 33(4):48–57, <https://doi.org/10.5670/oceanog.2020.405>.

Degraer S., Kerckhof, F., Reubens, J., Vanermen, N., de Mesel, I., Rumes, B., Stienen, W.M. S., Vandendriessche, E. & Vincx, M. 2013- Not necessarily all gold that shines: appropriate ecological context setting needed! In Degraer, S., Brabant, R. & Rumes, B. (eds), Environmental impacts of offshore wind farms in the Belgian part of the North Sea, Chapter 17: 174-181.

De Mesel, I., F. Kerckhof, A. Norro, B. Rumes, and S. Degraer. 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(37):37–50, <https://doi.org/10.1007/s10750-014-2157-1>.

Mark Desholm, Avian sensitivity to mortality: Prioritising migratory bird species for assessment at proposed wind farms, *Journal of Environmental Management*, Volume 90, Issue 8, 2009, Pages 2672-2679, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.02.005>.

Díaz, H., & Soares, C. G. (2020). Review of the current status, technology and future trends of offshore wind farms. *Ocean Engineering*, 209, 107381.

Draper, A.M., and M.J. Weissburg. 2019. Impacts of global warming and elevated CO₂ on sensory behavior in predator-prey interactions: A review and synthesis. *Frontiers in Ecology and Evolution* 7:72, <https://doi.org/10.3389/fevo.2019.00072>.

Espinosa, V., I. Perez-Arjona, V. Puig, E. Soliveres, P. Ordóñez, P. Poveda Martínez, J. Soriano, and F. de la Gándara. 2014. Effects on bluefin tuna behaviour of offshore wind turbine operational noise. Paper presented at the International Marine Conservation Congress, Glasgow, Scotland, August 14–18, 2014.

Firth, L.B., L. Airolidi, F. Bulleri, S. Challinor, S.-Y. Chee, A.J. Evans, M.E. Hanley, A.M. Knights, K. O'Shaughnessy, R.C. Thompson, and S.J. Hawkins. 2020. Greening of grey infrastructure should not be used as a Trojan horse to facilitate coastal development. *Journal of Applied Ecology* 57(9):1,762–1,768, <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13683>.

Fowler, A.M., A.M. Jørgensen, J.W.P. Coolen, D.O.B. Jones, J.C. Svendsen, R. Brabant, B. Rumes, and S. Degraer. 2020. The ecology of infrastructure decommissioning in the North Sea: What we need to know and how to achieve it. *ICES Journal of Marine Science*. 77(3):1,109–1,126, <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsz143>.

Galparsoro, I., Menchaca, I., Garmendia, J.M. *et al.* Reviewing the ecological impacts of offshore wind farms. *npj Ocean Sustain* 1, 1 (2022). <https://doi.org/10.1038/s44183-022-00003-5>

Garthe, S., Schwemmer, H., Peschko, V., Markones, N., Müller, S., Schwemmer, P., & Mercker, M. (2023). Large-scale effects of offshore wind farms on seabirds of high conservation concern. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-31601-z>

Ghassen Halouani, Ching-Maria Villanueva, Aurore Raoux, Jean Claude Dauvin, Frida Ben Rais Lasram, Eric Foucher, François Le Loc'h, Georges Safi, Emma Araigous, Jean Paul Robin, Nathalie Niquil, A spatial food web model to investigate potential spillover effects of a fishery closure in an offshore wind farm, *Journal of Marine Systems*, Volume 212, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2020.103434>.

Glarou, M., M. Zrust, and J.C. Svendsen. 2020. Using artificial-reef knowledge to enhance the ecological function of offshore wind turbine foundations: Implications for fish abundance and diversity. *Journal of Marine Science and Engineering* 8(5):332, <https://doi.org/10.3390/jmse8050332>.

Hermans, A., O.G. Bos, and I. Prusina. 2020. *Nature-inclusive Design: A Catalogue for Offshore Wind Infrastructure: Technical Report*. Technical report no. 114266/20-004.274, Den Haag: Witteveen+Bos, 120 pp.

Kerckhof, F., B. Rumes, and S. Degraer. 2019. About “mytilisation” and “slimeification”: A decade of succession of the fouling assemblages on wind turbines off the Belgian coast. Pp. 73–84 in *Environmental Impacts of Offshore Wind Farms in the Belgian Part of the North Sea: Marking a Decade of Monitoring, Research and Innovation*. S. Degraer, R. Brabant, B. Rumes, and L. Vigin, eds., Royal Belgian Institute of Natural Sciences, OD Natural Environment, Marine Ecology and Management, Brussels.

Krone, R., G. Dederer, P. Kanstinger, P. Krämer, and C. Schneider. 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>.

Lefaible, N., L. Colson, U. Braeckman, and T. Moens. 2019. Evaluation of turbine-related impacts on macrobenthic communities within two offshore wind farms during the operational phase. Pp 47–64 in *Environmental Impacts of Offshore Wind Farms in the Belgian Part of the North Sea: Marking a Decade of Monitoring, Research and Innovation*. S. Degraer, R. Brabant, B. Rumes, and L. Vigin, eds, Royal Belgian Institute of Natural Sciences, OD Natural Environment, Marine Ecology and Management, Brussels, Belgium.

Lemasson, A.J., Somerfield, P.J., Schratzberger, M. *et al*. Evidence for the effects of decommissioning man-made structures on marine ecosystems globally: a systematic map. *Environ Evid* 11, 35 (2022). <https://doi.org/10.1186/s13750-022-00285-9>

Mavraki, N. (2020). On the food-web ecology of offshore wind farms, the kingdom of suspension feeders (Doctoral dissertation, PhD Dissertation, Ghent University, Belgium).

Mavraki, N., I. De Mesel, S. Degraer, T. Moens, and J. Vanaverbeke. 2020a. Resource niches of co-occurring invertebrate species at an offshore wind turbine indicate a substantial degree of trophic plasticity. *Frontiers in Marine Science* 7:379, <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00379>.

Paul D. Causon, Andrew B. Gill, Linking ecosystem services with epibenthic biodiversity change following installation of offshore wind farms, *Environmental Science & Policy*, Volume 89, 2018, Pages 340–347, ISSN 1462-9011, <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.08.013>

Peschko, V., Mercker, M., & Garthe, S. (2020). Telemetry reveals strong effects of offshore wind farms on behaviour and habitat use of common guillemots (*Uria aalge*) during the breeding season. *Marine Biology*, 167(8). <https://doi.org/10.1007/s00227-020-03735-5>

Reubens, J.T., S. Degraer, and M. Vincx. 2014. The ecology of benthopelagic fishes at offshore wind farms: A synthesis of 4 years of research. *Hydrobiologia* 727:121–136, <https://doi.org/10.1007/s10750-013-1793-1>.

Russell, D.J.F., S.M.J.M. Brasseur, D. Thompson, G.D. Hastie, V.M. Janik, G. Aarts, B.T. McClintock, J. Matthiopoulos, S.E.W. Moss, and B. McConnell. 2014. Marine mammals trace anthropogenic structures at sea. *Current Biology* 24(14):R638–R639, <https://doi.org/10.1016/j.cub.2014.06.033>.

Schwemmer, P., Mercker, M., Haecker, K., Kruckenberg, H., Kämpfer, S., Bocher, P., Fort, J., Jiguet, F., Franks, S. E., Elts, J., Marja, R., Piha, M., Rousseau, P., Pederson, R., Düttmann, H., Fartmann, T., & Garthe, S. (2023b). Behavioral responses to offshore windfarms 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>

Soudijn, F. H., van Donk, S., Leopold, M. F., van der Wal, J. T., & Hin, V. (2022). Cumulative population-level effects of habitat loss on seabirds 'Kader Ecologie en Cumulatie 4.0'. (Wageningen Marine Research report; No. C007/22). Wageningen Marine Research. <https://doi.org/10.18174/565601>

Tickell, S.C.Y., A. Sáenz-Arroyo, and E.J. Milner-Gulland. 2019. Sunken worlds: The past and future of human-made reefs in marine conservation. *BioScience* 69:725–735, <https://doi.org/10.1093/biosci/biz079>.

Vanermen, N., W. Courtens, M. Vande Walle, H. Verstraete, and E. Stienen. 2017. Seabird monitoring at the Thornton Bank offshore wind farm: Updated seabird displacement results as an explorative assessment of large gull behaviour inside the wind farm. Pp. 85–114 in *Environmental Impacts of Offshore Wind Farms in the Belgian Part of the North Sea: A Continued Move Towards Integration and Quantification*. S. Degraer, R. Brabant, B. Rumes, and L. Vigin, eds, Royal Belgian Institute of Natural Sciences, OD Natural Environment, Brussels.

Vanermen, N., W. Courtens, R. Daelemans, L. Lens, W. Müller, M. Van de walle, H. Verstraete, and E. Stienen. 2020. Attracted to the outside: A meso-scale response pattern of lesser black-backed gulls at an offshore wind farm revealed by GPS telemetry. *ICES Journal of Marine Science* 77(2):701–710, <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsz199>.

van Hal, R., A.B. Griffioen, and O.A. van Keeken. 2017. Changes in fish communities on a small spatial scale, an effect of increased habitat complexity by an offshore wind farm. *Marine Environmental Research* 126:26–36, <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2017.01.009>.

Vilela, R., Bürger, C., Diederichs, A., Bachl, F. E., Szostek, L., Freund, A., Braasch, A., Bellebaum, J., Beckers, B., Piper, W., & Nehls, G. (2021). Use of an INLA latent gaussian modeling approach to assess bird population

changes due to the development of offshore wind farms. *Frontiers in Marine Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.701332>

Wilber, D., L. Read, M. Griffin, and D. Carey. 2020. Block Island Wind Farm Demersal Fish Trawl Survey Synthesis Report—Years 1 to 6, October 2012 through September 2018. Technical report prepared for Deepwater Wind, INSPIRE Environmental, Newport, RI, 182 pp.

Wilhelmsson, D., and T. Malm. 2008. Fouling assemblages on offshore wind power plants and adjacent substrata. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 79(3):459–466, <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2008.04.020>.

M.L. Zettler, F. Pollehne The impact of wind engine constructions on benthic growth patterns in the western Baltic Offshore Wind Energy, Springer (2006), pp. 201-222

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1462901118304556?via%3Dihub>

<https://academic.oup.com/icesjms/article/77/3/1092/5368123?login=true>

<https://www.mdpi.com/2077-1312/8/3/172>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211731225X?via%3Dihub>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720316314?via%3Dihub>

<https://www.nature.com/articles/s43247-022-00625-0>

<https://www.nature.com/articles/s41598-021-89537-1>

<https://link.springer.com/article/10.1007/s10336-019-01696-1#citeas>

<https://environmentalevidencejournal.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13750-022-00285-9#citeas>