

Solutions d'augmentation de biodiversité au sein de parcs éoliens

Alice BELIERES

Tutrice : Julie DETER



Rapport présenté dans le cadre du diplôme universitaire de Restauration écologique des petits fonds marins côtiers



Département Biologie-
Ecologie
Université de
Montpellier
France
20 mai 2024



Synthèse

L'objectif de ce mémoire est d'établir des préconisations générales pour la mise en place de futures solutions d'augmentation de biodiversité (SAB) au sein de parcs éoliens à partir de retours d'expériences. L'introduction d'éoliennes en mer induit de multiples impacts même si leur assimilation à des réserves marines a été observé sur certains parcs. Dans ce contexte, des équipements appelés par la suite SAB se sont développés afin d'améliorer la biodiversité locale sur les sites d'implantation de parcs éoliens. Dans quelle mesure l'utilisation de ces solutions implantées au cœur des parcs éoliens permet-elle d'augmenter le biodiversité marine ? Des retours d'expérience de pose de SAB néerlandais, anglais et français seront analysés. Des préconisations générales et de futures thématiques seront établies afin d'orienter au mieux la mise en place de solutions à l'avenir. Des éléments d'aide à la décision d'introduire ou non des SAB sur zone d'implantation ont également été établis à partir des bilans environnementaux du parc de Saint-Brieuc.

Notre étude a permis de développer, pour de futures mises en place de SAB, des préconisations générales concernant : (i) le design et la localisation interne dans le parc ; (ii) la logistique et l'installation de la solution, (iii) la limitation de la sélection génétique ; (iv) la caractérisation écologique ; (v) les espèces parasites et invasives. De plus, de futures thématiques ont été proposées dans le développement de l'utilisation de SAB concernant : (i) le design et la localisation interne ; (ii) la caractérisation écologique et la pyramide écologique et (iii) les liens à l'échelle d'un parc éolien.

L'introduction de SAB peut accentuer les changements de communautés par rapport à l'état de référence. Des éléments comme la stabilité des paramètres de biodiversité locale ou l'efficacité des mesures de réduction d'incidence d'impacts peuvent justifier l'aspect superflu de l'ajout de SAB.

Table des matières

Synthèse.....	2
Abréviations	4
Figures.....	5
Tableaux.....	5
Introduction	6
I. Solutions existantes pour l’augmentation de la biodiversité marine	9
1. Définition de l’augmentation de la biodiversité et critères d’évaluation.....	9
2. Solutions d’augmentation de biodiversité (SAB) au sein de parcs éoliens sélectionnés.....	10
II. Analyse des projets sélectionnés de SAB actuelles	16
1. Paramètres considérés dans les études.....	16
2. Résultats des initiatives de SAB sélectionnées	16
III. Futures mises en place de SAB autour d’éoliennes en mer.....	18
1. Echecs des techniques et points d’améliorations.....	18
2. Préconisations générales pour les SAB.....	18
3. Futures thématiques.....	19
4. Augmentation réelle de biodiversité et changement de communautés.....	21
IV. Réflexions sur l’intégration de SAB sur zone d’implantation	22
1. Résultats des bilans environnementaux du parc de Saint-Brieuc	22
2. Réflexions sur le choix d’introduction de SAB	24
V. Conclusion.....	24
Annexe	26
VI. Références	30

Abréviations

GW	Gigawatt
Gt CO2 equiv	Gigatonnes de dioxyde de carbone équivalent
MWh	Mégawatt heure
CNDP	Commission Nationale du Débat Public
SAB	Solution d'augmentation de biodiversité
ERC	Démarche Eviter, Réduire, Compenser
CRC	Comité Régional de la Conchyliculture
M	Mètre
m ²	Mètre carré
pH	Potentiel d'hydrogène
Mile	Mile nautique
CMD	Cadre métallique et dôme
EFGL	Eoliennes flottantes du Golfe du Lion
UOS	Unités d'observation standardisées
DCSM-FM	3D Dutch Continental Shelf Model in Flexible Mesh
CHL-A	Chlorophylle-a
BoB	Bouée d'observation de biodiversité
FOREVER	Projet de restauration d'huitres plates (Flat Oyster Recovery)
eDNA	ADN environnemental
HDPE	Polyéthylène haute densité
ROV	Véhicule sous-marin téléopéré

Figures

Figure 1 Impacts potentiels groupés par opportunités et risques de l’implantation d’éoliennes en mer et leur raccordement en excluant les impacts cumulatifs liés à l’échelle du parc et une vision plus précise des impacts potentiels à la côte au niveau du raccordement d’après (CNDP, 2021)..... 7

Figure 2 Design de Solution d’augmentation de biodiversité dans le parc de Luchterduinen (Pays-Bas) composée de cadres métalliques avec ou sans huitres, de support d’huitres (A), de dômes (B) et de collecteurs de naissains (C) selon agencement décrit d’après (Sas, van der Have, Kamermans, & Lengkeek, 2018) 11

Figure 3 Résultats de la SAB dans le parc de Luchterduinen (Pays-Bas) : à gauche pendant premier suivi en Juillet 2019 avec une forte accrétion visible ; à droite lors du démantèlement 12

Figure 4 Design de SAB nommé WERC Dock déployé au site de test offshore à Scheveningen en 2021 d’après (Bos, et al., 2023) 13

Figure 5 Design de SAB nommée bouée d’observation de biodiversité déployée en 2019 à 9nm de Leucate en zone de EFGL en Méditerranée. A droite fixation d’UOS (biohut) sur éolienne flottante en phase d’assemblage fin 2023 d’après (Ecocean; Agence de l’Eau Rhone Méditerranée Corse, 2021) 14

Figure 6 Design de SAB présentée pour l’étude de la zone de Gunfleet Sands à Colchester d’après (Robertson, Locke, Uttley, & Hammerson, 2021) 15

Figure 7 Présentation de toutes les SAB analysées dans ce rapport : 1. Solution de cadres métalliques accrochés et dômes ; 2. WERC-Dock Piquet avec pieds et bras supportant des sacs de naissains ; 3. Biohuts accrochés à bouée ou éolienne ; 4. Sacs huitres génitrices positionnées au niveau des pierres de protection contre affouillement au pied de l’éolienne 15

Figure 8 Distinction de communautés à partir d’espèces présentes sur parc éolien, fonds sableux et récifs d’après (Bos, et al., 2023)..... 21

Tableau

Table 1 Solutions d’augmentation de biodiversité pour les éoliennes en mer et sous-stations incluant de l’éco-conception d’après (Blue Marine Foundation, MRAG, 2023)..... 29

Introduction

Le déploiement de l'éolien en mer en Europe et en France dans les prochaines années va connaître une accélération importante. Les objectifs de production électrique issus d'énergie marine renouvelable sur les bassins européens sont de 60 GW d'ici à 2030 et 340 GW d'ici à 2050 (Parlement Européen, 2021). En France, le développement de l'éolien offshore a pour objectifs d'atteindre 18 GW en service d'ici 2030 et *a minima* 40 GW en 2050 (Secrétariat d'Etat chargé de la Mer, 2023). Face à cette croissance plutôt soudaine et ce calendrier ambitieux, la planification spatiale des usages maritimes est soumise à de fortes contraintes à cause de nombreux conflits d'usages dans l'espace maritime. Cette évolution pose également la question de l'état écologique actuel et futur des fonds marins. Les connaissances autour des impacts environnementaux de l'empreinte de l'éolien en mer ont beaucoup progressé au cours de ces dernières années même si de nombreuses connaissances restent lacunaires (Ashley, Mangi, & Rodwell, 2014). Notamment, l'effet sillage provoqué par le positionnement des turbines au sein du parc et la force du vent rajoutent de potentiels impacts sur la production primaire et l'oxygénation des fonds à l'échelle des bassins (Daewel, Akhtar, Christiansen, & Schrum, 2022). Une réduction du transport de chaleur en aval des parc éoliens à l'interface air-mer est également observée poussant à prendre en compte les impacts des groupements denses de parcs éoliens à large échelle sur le changement des conditions atmosphériques locales (Akhtar, Geyer, & Schrum, 2022). Dans le cadre du développement de l'éolien en mer et selon son cycle de vie à l'échelle mondiale, les estimations d'émissions se situent entre 2.6–3.6 Gt CO₂ equiv de gaz à effet de serre sur la période entre 2020 et 2040. Dans le même temps, l'expansion de parcs, l'extension de la durée de vie des parcs et l'innovation technologique conduisent à une relative diminution d'en moyenne 20% per MWh des impacts supplémentaires (eutrophication, écotoxicité épuisement des ressources minières) (Li, Mogollón, Tukker, & Steubing, 2022).

La complexité et l'étendue des impacts de l'éolien en mer touchent une variété de compartiments récepteurs à différentes échelles selon la phase de développement du parc (Figure 1).

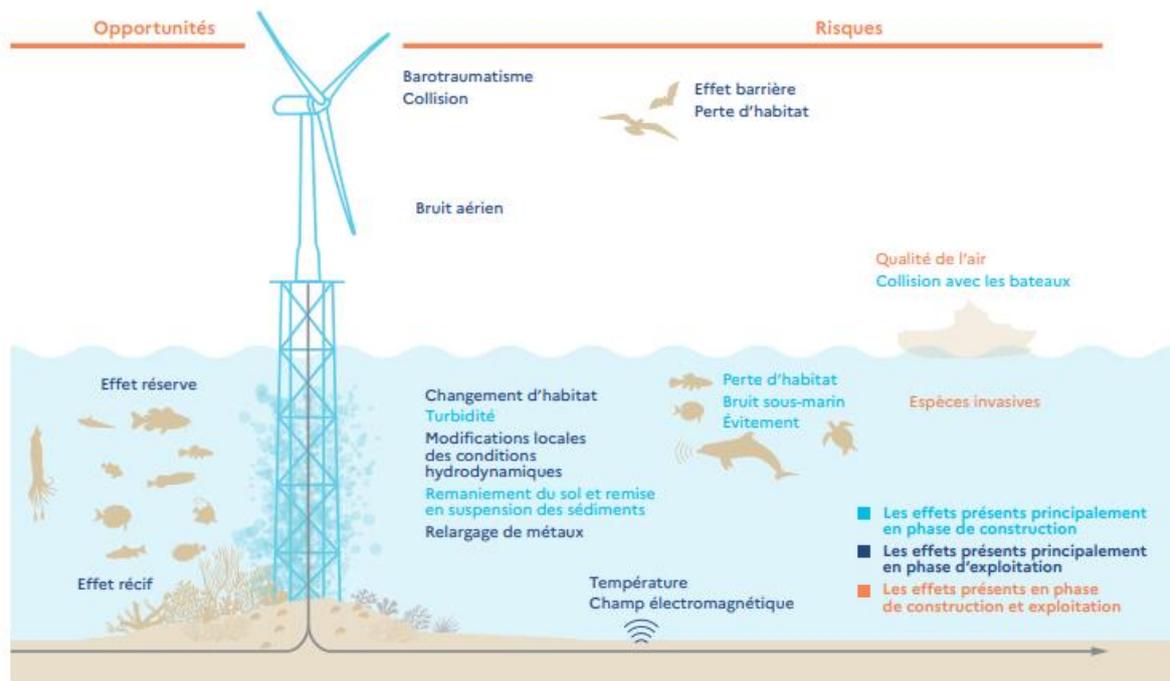


Figure 1 Impacts potentiels groupés par opportunités et risques de l'implantation d'éoliennes en mer et leur raccordement en excluant les impacts cumulatifs liés à l'échelle du parc et une vision plus précise des impacts potentiels à la côte au niveau du raccordement d'après (CNDP, 2021)

Néanmoins, des impacts positifs d'effet récif et d'effet réserve sont observés. Le développement de biomasse et de richesse sur des structures artificielles telles que des fondations d'éoliennes conduit à un « effet récif ». L'enrichissement résultant de cette colonisation entraîne un « effet réserve » s'il n'est pas exploité, notamment grâce aux zones d'exclusions mise en place sur le parc (CNDP, 2021) (voir Figure 1). L'effet réserve n'est pas systématiquement observé sur les retours d'expériences de précédents parcs éoliens au large du Danemark, des Pays-Bas et de la Belgique. L'effet récif est également sujet à controverse, observé sur 10 ans de suivis environnementaux sur un parc éolien (Belgique, Thornton Bank) ou non constaté sur d'autres parcs (CNDP, 2021).

Les retours d'expériences témoignent d'une disparité observée sur le type de communautés colonisant les zones d'implantations. Sur certains parcs, le développement de biomasse épibenthique, necto-benthique est favorisé et la densité d'ichtyofaune est en baisse (Belgique, Thornton Bank) (Degraer, Brabant, Rumes, & Vigin, 2021)(Ashley, Mangi, & Rodwell, 2014). D'autres parcs favorisent une forte abondance et diversité ichthyque au niveau des fondations (Glarou, Zrust, & Svendsen, 2020). Une diminution d'abondances d'espèces d'algues a également été observée (Ashley, Mangi, & Rodwell, 2014).

En parallèle de ce développement de l'éolien en mer, l'Union Européenne a lancé en 2020 sa stratégie en faveur de la biodiversité à l'horizon 2030. Le règlement sur la Restauration de la Nature acté en 2024 s'applique également aux écosystèmes marins. Celui-ci vise à imposer des mesures ayant pour

objectif de restaurer 20% des espaces marins (dont au moins 30% des habitats déclarés en mauvais état d'ici 2030). Cette démarche européenne est susceptible de contribuer de manière significative à la lutte contre le changement climatique.

Dans ce contexte, des initiatives pilotes d'enrichissement de biodiversité épi-benthique et ichtyofaunique ont été lancées au sein de parcs éoliens en phase d'exploitation ou de développement en mer du Nord et en Méditerranée (Bos, et al., 2023)(Degraer, Brabant, Rumes, & Vigin, 2021) (Ecocean; Agence de l'Eau Rhone Méditerranée Corse, 2021). Ces solutions techniques correspondent à des équipements posés ou accrochés qui visent à accroître le potentiel d'accueil de biodiversité sur la partie immergée des éoliennes ou à proximité selon le type de fondations.

Avec l'introduction de ces solutions sur site d'implantation d'éoliennes, nous nous demanderons s'il est possible de profiter de ces équipements pour augmenter la biodiversité marine locale d'un parc éolien. L'objectif de ce mémoire est d'établir des préconisations générales et futures thématiques pour la mise place, à l'avenir, de SAB au sein de parcs éoliens à partir de retours d'expériences. Notre étude se focalisera sur des solutions existantes dans les zones géographiques de la mer du Nord et de la Méditerranée et uniquement sur la biodiversité locale sans traiter des aspects de compensation liés à la démarche ERC (Eviter, Réduire, Compenser).

Nous nous concentrerons d'abord sur les définitions d'augmentation de biodiversité puis nous présenterons les solutions d'augmentation de biodiversité (SAB) actuelles choisies en raison de la disponibilité de ces études dans le domaine public. Puis nous analyserons les résultats et les paramètres utilisés lors de la mise en place de ces solutions. Nous en déduirons des préconisations plus générales et futures thématiques afin d'orienter au mieux la mise en place de futures solutions.

Enfin, nous nous interrogerons sur la légitimité d'introduire ces solutions sur des zones déjà perturbées par la présence d'éoliennes en analysant les bilans environnementaux du parc de Saint-Brieuc. Nous proposerons des éléments pouvant guider le choix d'introduction de ces solutions ou non.

I. Solutions existantes pour l'augmentation de la biodiversité marine

1. Définition de l'augmentation de la biodiversité et critères d'évaluation

L'évaluation de la biodiversité marine est complexe même si de nombreux indicateurs ont pu être regroupés afin de mieux l'estimer ces dernières années. La complexité des liens entre espèces, habitats et écosystèmes sont évalués par des indices de diversité ou des variables essentielles de biodiversité (EBV) (abondance, distribution d'espèces) (McQuatters-Gollop, et al., 2022) (Jetz, McGeoch, Guralnick, & al, 2019). En lien avec l'évaluation des impacts d'activités et de pressions, des indicateurs et outils de mesure ont pu également être développés pour l'évaluation et le suivi de biodiversité pour différents types de compartiments et habitats notamment benthiques et pélagiques (Secrétariat Chargé de la Mer et de la Biodiversité, 2022) (Bernard, Janson, Gremare, Labrune, & Guérin, 2018). La disparité des données complexifie également une évaluation plus précise des impacts de ces activités sur la biodiversité locale (McQuatters-Gollop, et al., 2022).

L'augmentation de la biodiversité pour les infrastructures maritimes est encadrée par la mise en place de mesures co-créatrices veillant à ce que la biodiversité locale soit améliorée post-installation (The Crown Estate; ABP Mer, 2021). Des objectifs d'augmentation de biodiversité selon la localisation d'habitats et de structures offshore ont été créés. Parmi ces objectifs, nous pouvons citer la restauration de récifs huitriers, espèces à fort intérêt commercial (The Crown Estate; ABP Mer, 2021).

Dans notre étude, nous supposons que l'augmentation de la biodiversité implique un accroissement de celle-ci entre un état initial pré-installation et un état post-installation évalué par un suivi régulier. L'augmentation de la biodiversité a souvent été mesurée par abondance, richesse et diversité d'espèces, croissance et biomasse d'organismes (Benayas, Newton, Diaz, & Bullock, 2009).

Lors de précédents projets de restauration en France, en Bretagne en particulier, différentes méthodes ont été appliquées via translocation et réintroduction d'huitres plates sur des zones hors parcs éoliens (projet FOREVER). Ces techniques incluent les semis de naissains (dépôt de naissains collectés sur la période précédente), l'installation de récifs coquilliers en béton et 40-60% de débris coquilliers calcaires (avec différentes rugosités) mais également de l'enrichissement coquillier (dépôt d'huitres vides). Cette initiative a pris en compte la caractérisation des populations (larvaires et naissains) incluant l'état d'agrégation, leur distribution spatiale, l'impact de la prédation ainsi que la présence et distribution parasitaire. Les résultats de caractérisation écologique révèlent que la

méthode du récif coquillier adapté est celle qui permet la meilleure augmentation de biodiversité (état d'agrégation 3 à 4 et huîtres en forte densité).

D'autres paramètres importants ont également été répertoriés pour le déploiement de solutions d'augmentation de biodiversité autour d'éoliennes en mer au Royaume-Uni. Ces critères regroupent la présence de zones de fraie et celle de zones de nurseries, la présence d'espèces ciblées ou à défaut leur présence historique, le type d'activités de pêche autour de la zone d'implantation, le type d'habitat et la distance avec la zone d'implantation (Blue Marine Foundation, MRAG, 2023).

Les conditions hydrobiologiques (température, salinité, pH, turbidité, fluorescence liée au phytoplancton, vagues, oxygène) ont également été mesurées mais sont considérées comme des facteurs indirects, dans l'augmentation de la biodiversité. Ces paramètres seront donc exclus de notre analyse.

Ces paramètres permettent de guider notre analyse et de vérifier s'ils sont utilisés ou non dans les initiatives de SAB implantées dans les zones de fermes éoliennes sélectionnées.

2. Solutions d'augmentation de biodiversité (SAB) au sein de parcs éoliens sélectionnés

Un répertoire de solutions d'augmentation de la biodiversité a été développé pour les éoliennes en mer. Des solutions permettent d'optimiser la protection de l'affouillement, celle des câbles et des unités distinctes fixées sur structure (éoliennes et sous-stations) ainsi que celles de structures artificielles placées autour d'éoliennes (voir Table 1 en Annexe) (Blue Marine Foundation, MRAG, 2023). Les projets sélectionnés par la suite pour l'analyse correspondent à des solutions avec retours d'expériences même si d'autres initiatives sont en cours (Orsted, 2023).

Deux types de solutions peuvent être déployés actuellement sur des parcs éoliens : des SAB posées (fond meuble et dur) et des SAB fixées au niveau de la colonne d'eau. Les SAB sélectionnées se focalisent sur de l'augmentation de la biodiversité benthique et ichtyque au sein des parcs éoliens. Elles se concentrent soit sur le renforcement de populations d'huîtres plates européennes (*Ostrea edulis*) à proximité également de zones huitrières soit sur la réintroduction d'huîtres plates européennes en lien avec une présence historique de l'espèce (Robertson, Locke, Uttley, & Hammerson, 2021) (Didderen, Bergsma, & Kamermans, 2019)(Bos, et al., 2023). Une autre initiative vise à faire l'inventaire de la biodiversité vagile et ichtyque à partir d'un enrichissement coquillier et à mettre en évidence la connexion de certaines espèces avec des zones côtières (Ecocean; Agence de l'Eau Rhone Méditerranée Corse, 2021).

La première solution est un dispositif posé sur fond. Localisée en mer du Nord, dans le parc de Luchterduinen (Pays-Bas), elle consiste à déployer des cadres métalliques avec des sacs d’huitres matures accrochées. D’autres cadres comportant des sacs de protection de composition différentes (coquilles vides, marbre, silex, econcrete) sont installés de part et d’autre des cadres avec sacs d’huitres matures, de sorte que l’agencement final correspond à celui de la Figure 2. Des dômes en béton ont été installés à chaque bout des cadres métalliques, similaires à des récifs artificiels (Figure 2) (Sas, van der Have, Kamermans, & Lengkeek, 2018) (Didderen, Bergsma, & Kamermans, 2019). Cette solution sera nommée CMD par la suite.

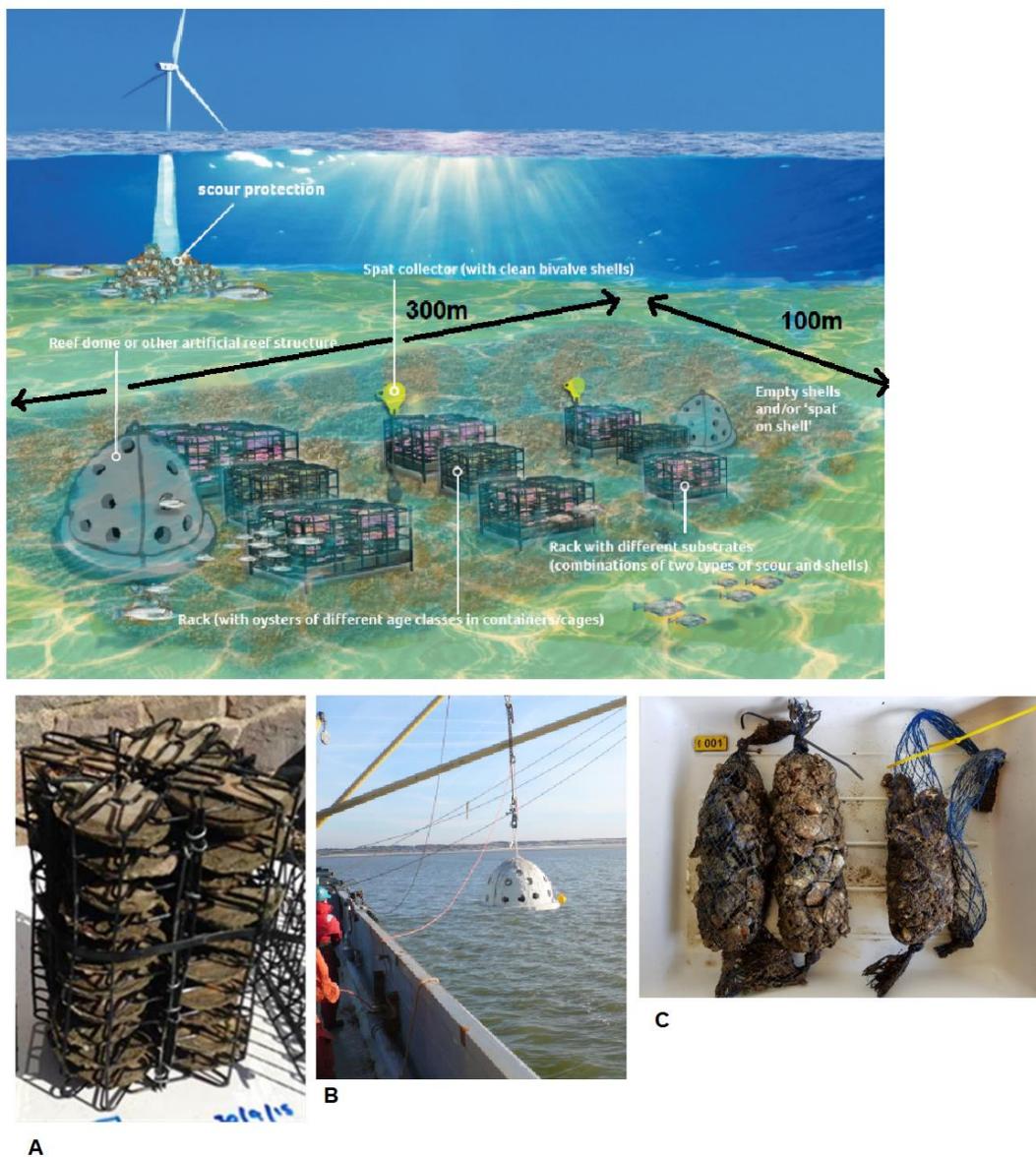


Figure 2 Design de Solution d’augmentation de biodiversité dans le parc de Luchterduinen (Pays-Bas) composée de cadres métalliques avec ou sans huitres, de support d’huitres (A), de dômes (B) et de collecteurs de naissains (C) selon agencement décrit d’après (Sas, van der Have, Kamermans, & Lengkeek, 2018)

Les premiers résultats de cette SAB ont amené les chercheurs à modifier le design de la solution. En effet, de fortes accrétions de sable ont enseveli les cadres métalliques et les dômes (Didderen, Bergsma, & Kamermans, 2019) (visible en Figure 3).

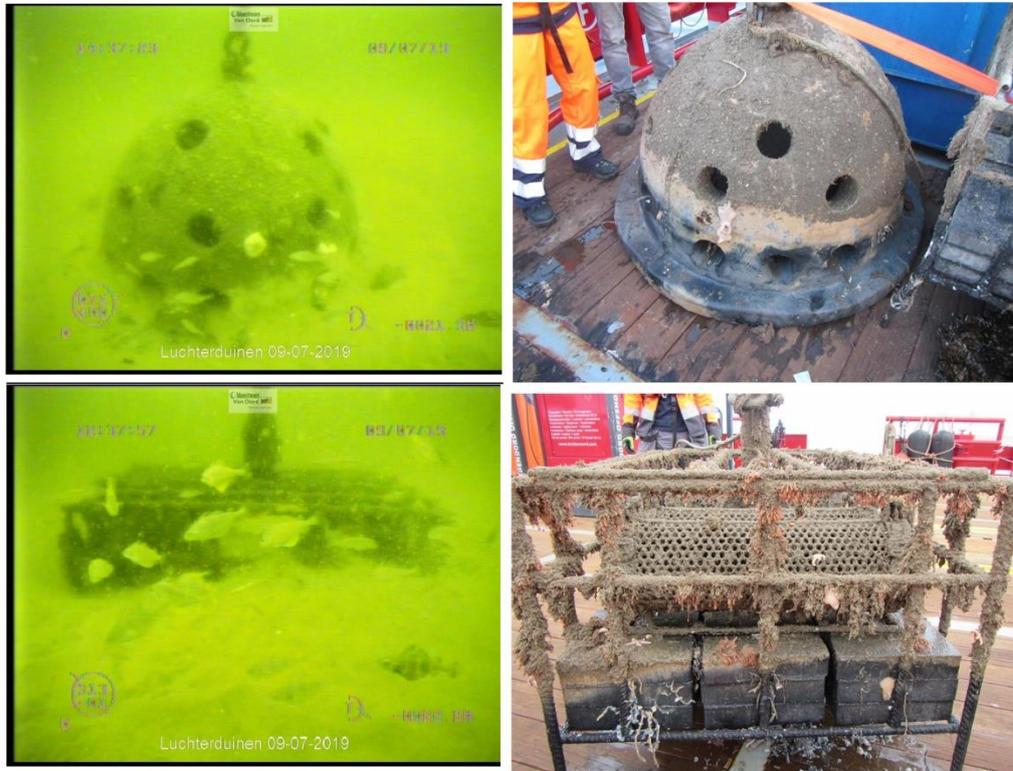


Figure 3 Résultats de la SAB dans le parc de Luchterduinen (Pays-Bas) : à gauche pendant premier suivi en Juillet 2019 avec une forte accréation visible ; à droite lors du démantèlement

Ce résultat accélère le développement d'un autre design nommé WERC-dock, deuxième solution étudiée, également posée sur fond. Cet équipement est issu de travaux d'amélioration de méthodes, tenant compte des courants de fond et de l'enfouissement subséquent. Celui-ci comporte un piquet stabilisé par un pied en croix muni de bras formant des étagères pour positionner les sacs (Figure 4).



Figure 19. Prototype **WERC-Dock** before deployment.



Figure 20. Final design of **WERC-dock** just before deployment in February 2021.

Figure 4 Design de SAB nommé WERC Dock déployé au site de test offshore à Scheveningen en 2021 d'après (Bos, et al., 2023)

Ce design a prouvé son efficacité en termes de diminution de l'enfouissement et de l'accrétion grâce à la stabilisation du pied de la structure dans les sédiments. Une croissance accrue de la biodiversité et une augmentation de la survie d'huitres s'en est suivie. Un ajustement de stabilité peut-être également effectué en étendant la longueur des pieds selon le nombre d'étages de la structure avant déploiement afin de prendre en compte les risques de glissement et de renversement (Bos, et al., 2023).

En Méditerranée, dans le cadre du déploiement du projet pilote des éoliennes flottantes du Golfe du Lion (EFGL), une bouée d'observation de la biodiversité a été installée en 2019 au large de Leucate à 9 miles nautique (nm) afin de caractériser le type de biodiversité se développant et dans le but d'évaluer les connexions avec la côte. Cette bouée, solution de colonne d'eau est équipée d'unités d'observation standardisées (UOS) également appelées biohuts, fixées à la bouée entre 4 et 8 mètres de profondeur (voir Figure 5). Les résultats obtenus ont été comparés à ceux d'un récif artificiel à 1nm et à ceux de zones côtières (lagune et port), tous deux également équipés de biohuts. L'objectif de cette initiative consistait à développer un inventaire de biodiversité. En assemblage fin 2023, les EFGL équipées de biohuts permettront de comparer la biodiversité accumulée avec les résultats de la bouée et les potentiels liens avec la côte (Ecocean; Agence de l'Eau Rhone Méditerranée Corse, 2021) (Ecocean, 2024).

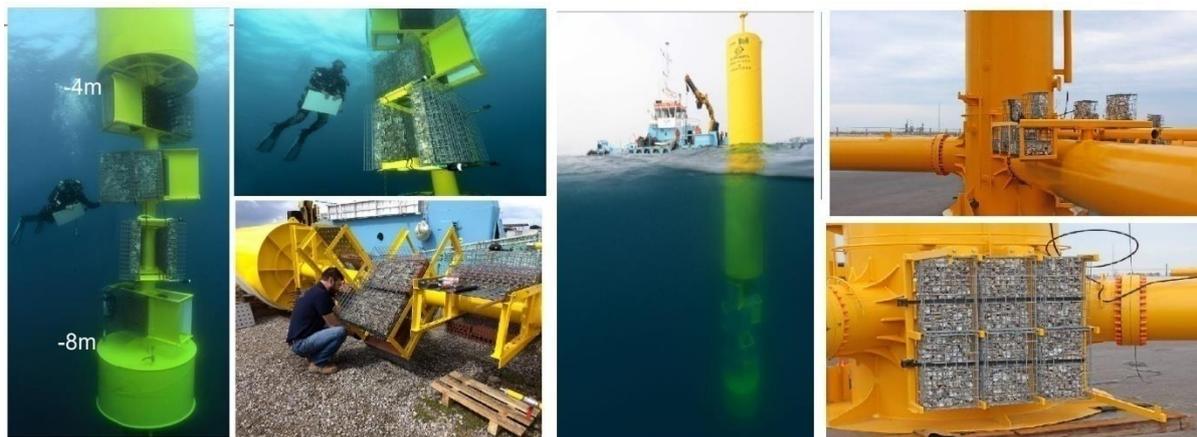


Figure 5 Design de SAB nommée bouée d'observation de biodiversité déployée en 2019 à 9nm de Leucate en zone de EFGL en Méditerranée. A droite fixation d'UOS (biohut) sur éolienne flottante en phase d'assemblage fin 2023 d'après (Ecocean; Agence de l'Eau Rhone Méditerranée Corse, 2021)

Des solutions de mesures ont également été développées en parallèle au déploiement des SAB. La valve gape monitor est une technique de suivi in-situ de la survie de l'huître en Mer du Nord. Via un système d'électrodes fixées sur les deux valves de l'huître, ce système permet de mesurer la largeur et la fréquence d'ouverture et la fermeture de l'huître donc d'obtenir un aperçu de son activité journalière (disponibilité en nourriture, stress) en lien avec les mesures de chlorophylle-a, de la turbidité et de la température de l'eau (Bos, et al., 2023). Un modèle de prédiction DCSM-FM des courants et de température a été utilisé pour déterminer la meilleure période et localisation de fraie d'huîtres afin d'obtenir la fenêtre de prélèvements. Ce modèle a également été utilisé pour étudier la mobilité des huîtres sur le fond (Bos, et al., 2023).

Un modèle similaire hydrodynamique a été utilisé sur les éoliennes de Gunfleet Sands à Colchester au Royaume-Uni informant sur la dispersion de larves. Ce modèle a permis d'évaluer la pertinence de la zone d'implantation d'éoliennes en tant que site géniteur de l'huître plate à proximité d'une zone de conservation, de site de restauration ENORI et de sites de repopulations (Ray Sands, Wallet, Whitaker). La SAB développée est de type posé sur fonds et correspond à des sacs d'huîtres génitrices accrochés sur la partie haute d'une cage métallique, un design similaire à celui de Luchterduinen (voir Figure 6) (Robertson, Locke, Uttley, & Hammerson, 2021).

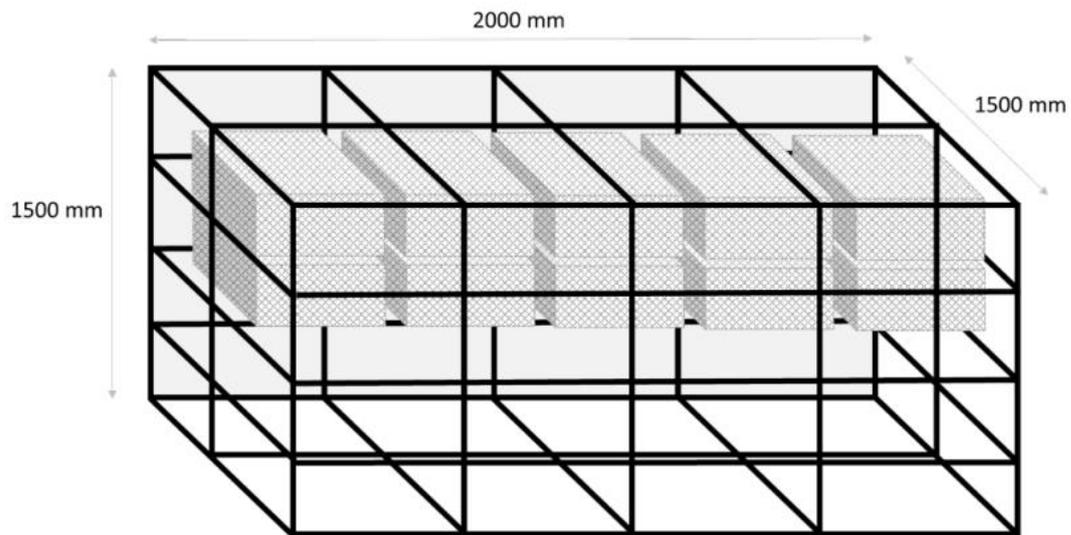


Figure 6 Design de SAB présentée pour l'étude de la zone de Gunfleet Sands à Colchester d'après (Robertson, Locke, Uttley, & Hammerson, 2021)

Les types de SAB qui seront analysés sont schématiquement représentés en Figure 7.

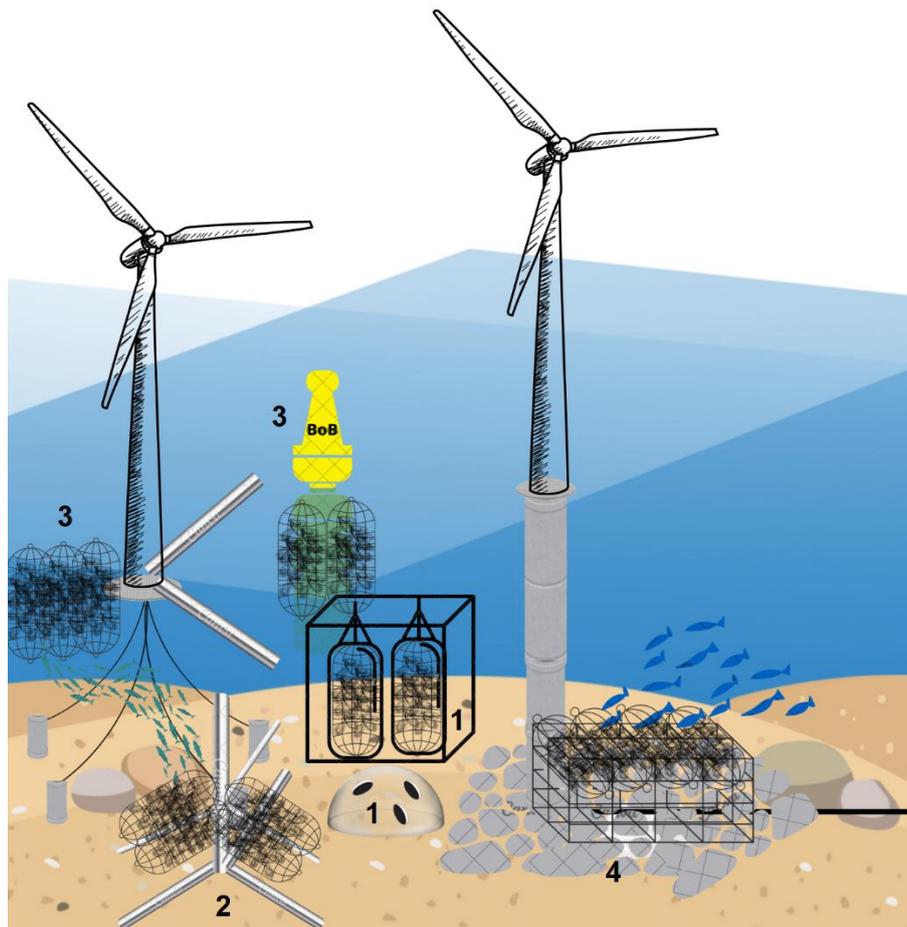


Figure 7 Présentation de toutes les SAB analysées dans ce rapport : 1. Solution de cadres métalliques accrochés et dômes ; 2. WERC-Dock Piquet avec pieds et bras supportant des sacs de naissains ; 3. Biohuts accrochés à bouée ou éolienne ; 4. Sacs huîtres génitrices positionnées au niveau des pierres de protection contre affouillement au pied de l'éolienne

II. Analyse des projets sélectionnés de SAB actuelles

1. Paramètres considérés dans les études

Plusieurs remarques peuvent être formulées sur les paramètres considérés dans les initiatives de SAB retenues dans notre analyse.

Sur les paramètres d'infrastructure, plusieurs solutions utilisent des méthodes similaires d'introduction d'huitres génitrices, des méthodes d'attraction de larves par enrichissement coquillier ou des modèles hydrodynamiques de dispersion larvaires. Ces solutions sont déployées sur des parcs éoliens à fondations mono-pieux ou sur zone de futures éoliennes flottantes ou proche de parc éoliens (site de test). Les matériaux utilisés sont le métal ou le béton pour les structures de support avec anodes pour éviter la corrosion (Blue Marine Foundation, MRAG, 2023) (Bos, et al., 2023) (Ecocean; Agence de l'Eau Rhone Méditerranée Corse, 2021) (Didderen, Bergsma, & Kamermans, 2019).

Sur les paramètres de caractérisation écologique, les variables utilisées pour mesurer les populations des espèces ciblées sont majoritairement les taux d'abondance et de richesse d'espèces. La dispersion des larves et recrues est étudiée soit à l'aide de modèle de prédiction de courants en bassin et sur zone, soit sur des zones contrôles à proximité (Bos, et al., 2023) (Ecocean; Agence de l'Eau Rhone Méditerranée Corse, 2021). Deux études mesurent des paramètres de survie, de croissance et de reproduction des huitres. Bos et al. utilisent des paramètres in-situ avec le rythme journalier de l'huitre (ouverture et fermeture des valves) (Didderen, Bergsma, & Kamermans, 2019) (Bos, et al., 2023). Le projet d'Ecocéan se focalisant sur l'inventaire de biodiversité mesure l'abondance, la taille, la richesse d'espèces (faunes vagile et ichtyque) (Ecocean; Agence de l'Eau Rhone Méditerranée Corse, 2021).

Les paramètres additionnels distincts repérés lors des études sont inclus dans la partie : Préconisations générales pour les SAB.

2. Résultats des initiatives de SAB sélectionnées

Les résultats des études ont été regroupés puis analysés. L'analyse fait ressortir les points suivants :

- Sur les quatre solutions étudiées, trois sont posées sur fonds meubles sableux situés à moins de 40m de profondeur. La dernière solution est de type colonne d'eau, positionnée entre 4 et 8 mètres sur des fonds de 70 mètres de profondeur. Les profondeurs choisies pour les solutions s'adaptent en fonction des différents types de fondations d'éoliennes. Elles peuvent être soit posées sur le fond, entre deux éoliennes ou sur les dalles de protection d'affouillement, soit installées sur la colonne d'eau.

- Le déclenchement de lâchés de gamètes et la formation larvaire est dépendant de la température. La qualité dispersive larvaire et la mobilité des huitres peut être estimée par la force des courants, leur orientation jouant sur la dilution. Néanmoins, d'autres paramètres peuvent intervenir de manière plus locale au large et en surface (par ex. disponibilité des nutriments). La distance de dispersion est accentuée par les couloirs de courants des parcs éoliens. De meilleurs résultats de survie d'huitres et de concentrations larvaires peuvent être obtenus avec une quantité suffisante d'huitres génitrices par rapport à la force des courants et à la survenue d'évènements météorologiques sur zone. La prédiction de dépôt de larves sur une zone prédéfinie est difficile à obtenir.
- Le suivi in situ du comportement journalier des huîtres sur zone par la largeur et la fréquence d'ouverture et de fermeture de leur coquille est difficile à interpréter en raison de la divergence des résultats entre bassin et site en mer. Les méthodes de suivi ichtyque et larvaire semblent montrer des résultats disparates en utilisant l'eDNA. L'amélioration de ces méthodes de suivis soit par la production de nouvelles bases de références (ichtyofaune) soit par la diminution de la variabilité (suivi larvaire) est nécessaire afin d'obtenir de meilleures méthodes.
- La stabilité des SAB posées sur fond est fondamentale pour permettre la survie et le développement des populations d'huitres. Des équipements supplémentaires peuvent être ajoutés tels que des pins verticaux, résistant à l'enfouissement ou des anodes anticorrosion. La fluidification du passage des courants est un critère essentiel dans le design de SAB pour éviter les phénomènes d'affouillement et d'enfouissement. Le poids de la SAB posée doit être suffisamment lourd pour résister aux courants et suffisamment léger pour faciliter le hissage et l'immersion.
- La diversité (abondance et richesse) d'espèces observée sur une SAB dans la colonne d'eau peut être assimilable à celles de récifs artificiels matures avec une richesse croissante après une durée de pose de deux ans seulement. Cette diversité (vagile et ichtyque) est cependant moins développée que sur une zone naturelle (falaise). Pour autant, la pyramide écologique la SAB de colonne d'eau présente un déséquilibre avec un profil similaire à des zones artificielles. Cette pyramide présente un déficit de différents niveaux trophiques, loin

d'atteindre la qualité des zones naturelles (falaise). Des connexions entre populations sont visibles entre zone au large, zones côtières et récifs artificiels.

III. Futures mises en place de SAB autour d'éoliennes en mer

1. Echecs des techniques et points d'améliorations

Certaines techniques ont montré leurs limites telle celle de l'utilisation de ROV en lien avec le déploiement de certains designs ou la détermination d'abondances d'espèces. Les méthodes de eDNA et metabarcoding présentent aussi certaines contraintes dans le suivi larvaire avec une variabilité observée et un manque de nouvelles bases de références pour le suivi itchytyque. Ces écueils mettent en évidence le besoin d'approfondir les méthodes existantes (valve gape monitor, metabarcoding, eDNA) ou le couplage de méthodes (battements de cœur, cameras appâtées).

Ces contraintes entraînent également une standardisation des méthodes de suivis des espèces pour permettre des comparaisons inter-sites.

Pour les SAB posées sur fonds, des modèles hydrodynamiques plus complexes sur les forces en jeu sont à développer pour assurer la persistance et la stabilité des structures. Ces modèles doivent également prendre en compte le type de substrat dominant, la profondeur maximale et les niveaux d'énergies. Ces éléments permettront d'ajuster le design et le positionnement de SAB de fond. La cartographie et la caractérisation écologique (dynamiques de populations, origine génétique) des populations actives localisées sur des sites de restauration à proximité est à établir.

2. Préconisations générales pour les SAB

A partir de l'analyse des paramètres, ainsi que celles des résultats et contraintes, des éléments de préconisations plus générales appliquées aux SAB peuvent être énoncées.

Les éléments à prendre en compte afin d'augmenter les probabilités de réussite en matière d'augmentation de biodiversité sont les suivants :

1. Le positionnement et la stabilité sur fond ainsi que la proximité avec d'autres zones de repopulations sont nécessaires à prendre en compte pour les choix de design et la localisation interne de la SAB afin de maximiser les chances de repopulation et d'enrichissement. Le positionnement et la stabilité sur fond sont confortés par des résultats de modèles hydrodynamiques complexes. La caractérisation du transport sédimentaire et les apports

d'eaux douces pourraient être intégrés aux modèles hydrodynamiques pour le design de SAB en zone d'estuaire. Les contraintes d'opérabilité du parc notamment la profondeur sous coque et les effets de corrosion sont également à examiner.

2. L'utilisation de modèles de prédictions, de température et de courants combinés permet d'établir avec une meilleure précision la fenêtre de lâchés de gamètes et la mobilité des huitres libres
3. L'installation de la SAB et les vérifications d'installation peuvent être exécutées par ROV selon le design déployé. Néanmoins si certaines actions sont délicates, l'intervention de plongeurs est recommandée. Des zones de contrôle sans SAB (éoliennes seules) sont à intégrer pour comparaison.
4. La limitation de la sélection génétique peut être effectuée en priorisant l'introduction de populations d'espèces environnantes au maximum. Des choix alternatifs sont à envisager s'il y a absence de populations environnantes sur zone.
5. La caractérisation écologique de la zone de SAB est à déterminer par un inventaire de la biodiversité locale et une cartographie des zones de repopulation. Ces derniers peuvent être établis grâce :
 - b. Aux dynamiques de populations via :
 - i. Des paramètres lors des périodes de suivis (abondances, richesse, croissance)
 - ii. Des paramètres in situ (rythme journalier).
 - c. Aux types de communautés et d'habitats via :
 - i. La biophonie (suivi visuel et espèces nocturnes)
 - ii. L'évaluation des connexions avec d'autres zones de populations actives à proximité (origine génétique).
6. L'évaluation de la distribution d'espèces invasives et parasites est à prendre en compte dans la caractérisation écologique de la zone.

3. Futures thématiques

À la suite de ces préconisations générales, de futures thématiques restent à étudier sur les deux types de SAB. Plus de retours d'expériences d'installation et de suivis de SAB sont nécessaires notamment sur leur efficacité et sur les techniques employées. D'autres types de SAB adaptées pour des habitats non-récifaux (par ex. herbiers) sont à développer. Ces thématiques se focalisent :

Sur le design et la localisation interne avec des techniques permettant :

1. Optimisation des designs (nombre de sacs/cages par design et quantité de matériaux) à partir de matériaux biogéniques pour formation récifale afin d'obtenir de meilleurs résultats d'agrégation et de biodiversité associée. Ces matériaux doivent être adaptés aux besoins de plusieurs peuplements d'espèces.
2. Evaluation des avantages/inconvénients pour un démantèlement complet ou partiel lors du démantèlement des éoliennes
3. La localisation interne de SAB sur la partie immergée du mât (en cas d'éolien posé) peut être à considérer même si elle est peut-être moins appropriée étant donné d'autres effets (par ex. vibrations, courants).

Sur la caractérisation écologique et pyramides écologiques avec l'optimisation de méthodes permettant :

1. Estimations des quantités suffisantes d'individus d'espèces cibles à introduire
2. L'augmentation de diversité des niveaux trophiques pour une amélioration de la qualité de pyramide, en considérant par exemple un volume minimum critique pour certaines espèces
3. Le prélèvement et l'évaluation de la dispersion larvaire notamment les distances entre zones et l'origine génétique
4. La fixation et l'agrégation des naissains en tenant compte de la force des courants pour la formation de récifs
5. L'impact de la prédation sur la biodiversité locale pélagique
6. Evaluation de la présence et de la qualité des espaces fonctionnels présents dans la zone d'implantation avec SAB : fonctions refuge, nurserie, reproduction et lieu d'alimentation.

Sur les liens à l'échelle d'un parc éolien en développant des outils pour :

1. Evaluation de la caractérisation écologique à la lumière des impacts environnementaux connus des éoliennes sur les différents compartiments (par ex. impacts EMF sur le développement larvaire)
2. Déploiement de plusieurs SAB (de même design ou de designs différents) à différentes distances au sein d'un même parc pour évaluer la différence de biodiversité et les connexions entre SAB installées. Une comparaison avec des zones extérieures au parc peut être également pertinente
3. Estimation des impacts cumulatifs de plusieurs SAB sur une même zone et leurs liens socio-économiques (par ex. augmentation de l'effet collision avec l'effet récif

généralisé par plusieurs SAB). Comparaison de ces impacts cumulatifs sur plusieurs parcs (ou sur des extensions)

4. Evaluation et distinction entre l'effet récif et l'effet réserve, lors de l'ajout de SAB par des indicateurs potentiellement par des seuils de biomasse d'organismes et des seuils de richesse.

4. Augmentation réelle de biodiversité et changement de communautés

Les échecs, points d'amélioration et futures thématiques mettent notamment en lumière les difficultés d'évaluation de l'augmentation réelle de biodiversité autour des SAB. Si les solutions agissent comme des récifs artificiels, la question se pose de savoir comment différencier une augmentation d'une attraction de biodiversité. Les préconisations générales ci-dessus incluent les comparatifs de biodiversité avec des zones contrôle sans SAB.

L'ajout de SAB sur zone d'implantation d'éoliennes questionne également les changements de communautés à la suite du changement de substrat (immersion des fondations). La caractérisation écologique de certains parcs éoliens a été effectuée en comparaison avec des zones naturelles pour évaluer la disparité de communautés présentes et le type d'habitats associé (voir Figure 8) aux Pays-Bas (Bos, et al., 2023).

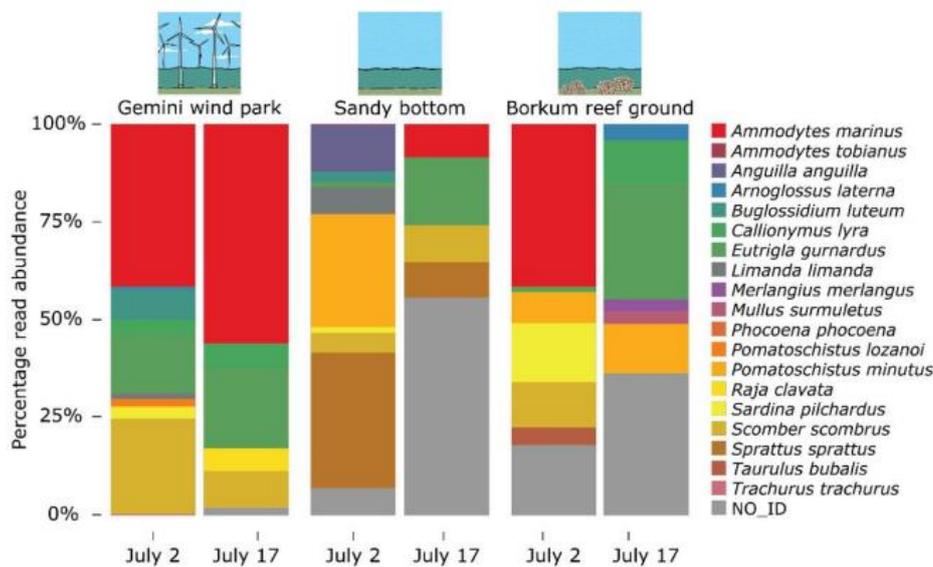


Figure 8 Distinction de communautés à partir d'espèces présentes sur parc éolien, fonds sableux et récifs d'après (Bos, et al., 2023)

A la suite de l'ajout d'éoliennes sur fonds sableux, les communautés se différencient de celles d'un d'habitat récifal après quelques semaines. Il existe une forte probabilité que l'ajout de SAB sur zone d'implantation d'éoliennes puisse entraîner à nouveau un changement de communautés.

Si on considère les conditions naturelles comme référence, l'ajout de SAB pourrait in fine mener à des perturbations supplémentaires au lieu de favoriser un rétablissement potentiel. Au mieux, les communautés obtenues avec ajout de SAB correspondraient à un mélange entre communautés liées à la présence d'éoliennes et communautés présentes en zones naturelles.

Le choix d'introduction de SAB devrait également tenir compte de la variété d'habitats sur zone de façon à revaloriser un large panel d'habitats sans préférence.

Ces questions incitent à une réflexion sur des éléments potentiels pouvant aider à discriminer les apports réels d'introduction de SAB sur les zones d'implantations d'éoliennes.

IV. Réflexions sur l'intégration de SAB sur zone d'implantation

1. Résultats des bilans environnementaux du parc de Saint-Brieuc

Le choix d'introduction de SAB sur zone d'implantation peut être guidé notamment en comparant la biodiversité locale entre l'état de référence en phase de pré-construction et les états en phase de construction et post construction.

Le parc de Saint-Brieuc, opérationnel depuis mai 2024 est constitué de 62 éoliennes posées sur une surface de 103km² avec des fonds compris entre 29 et 42 mètres. Les fondations utilisées sont de type jacket correspondant à un treillis métallique fixé sur le fond par trois pieux. Les bilans environnementaux des phases de pré-construction, construction et post-construction du parc éolien posé de Saint-Brieuc présentent l'état de référence et les suivis de différents compartiments récepteurs notamment la ressource halieutique, le benthos, la qualité de l'eau et des sédiments (Ailes Marines, 2023a)(Ailes Marines, 2023b).

En phase de pré-construction, les résultats des campagnes de ressource halieutique montrent que la distribution spatiale de certaines espèces au sein du parc est hétérogène avec des effets saisonniers (coquille Saint-Jacques, bulot). Cette hétérogénéité spatiale n'est pas modifiée lors des suivis de 2021 à 2022 même si des indices de capture sont en hausse dans le secteur sud comparé au nord. De plus, l'effet léthal des bruits de battage et forage n'est pas constaté sur les adultes de coquilles Saint Jacques et une survie de 96% est observée pour les larves et post-larves de coquille Saint Jacques exposés à 4 jours de bruit.

La biomasse et l'abondance d'espèces benthodémersales sont comparables à celles de l'état de référence avec le même cortège d'espèces. L'effet champ magnétique n'est pas détecté.

D'autres espèces s'étendent sur toute la zone d'étude (araignées) et en large quantité (amandes de mer, palourdes roses et pétoncles blancs). La biomasse, l'abondance et la distribution spatiale de ces espèces lors des suivis en phase de construction et en phase post-construction sont semblables aux années précédentes.

En phase de pré-construction, des variations de distribution temporelles naturelles, de ratio sexuel et préférences spatiales dans la baie de Saint Brieuc sont également observées pour la ponte de seiches. La variabilité de distribution temporelle naturelle est retrouvée de manière importante lors des suivis en phase de construction et post-construction avec une baisse importante de la ponte en 2021. L'impact du bruit des activités de battage et forage a été estimé important pour la seiche selon différents stades de son développement. Des distances d'impacts ont été établies :

- Zone jusqu'à 500 mètres : fort impact sur les œufs et larves de seiche
- Zone jusqu'à 300 mètres : fort impact en cas de battage sur les seiches adultes
- Zone de quelques mètres : fort impact des activités de forage.

Les résultats d'analyse de qualité de l'eau en phase de pré-construction montrent des valeurs de paramètres physico-chimiques correspondant au milieu étudié en saison automnale. Aucune pollution n'est détectée sur 41 substances de la DCE. Les mêmes résultats sont retrouvés pour les suivis en phase de construction et post-construction.

Les sédiments sur zone d'étude en phase de pré-construction sont homogènes avec une majorité de sables très grossiers, cailloux et graviers, typique de la zone géographique. Une absence de contamination est majoritairement observée sur toutes les stations. Cette absence persiste en phase de post-construction. On estime que le dépôt des sédiments a une incidence qualifiée de faible à moyen selon la granularité (gravier, sable) et la localisation dans le parc (nord, sud). La qualité des sédiments en phase de post-construction est en adéquation avec l'état de référence. Les niveaux de turbidité pendant travaux ont généré des teneurs matière en suspension équivalentes voire inférieures aux niveaux naturels.

Les résultats d'échantillons biologiques pour la faune benthique indiquent que la zone d'étude correspond à une biodiversité de zone ouverte avec une qualité écologique excellente pour les peuplements benthiques. Ces résultats se confirment pendant la phase post-construction avec les peuplements benthiques caractérisés par des richesses spécifiques et une répartition homogène entre les stations. Le peuplement à épibiose sessile, sensible aux perturbations physiques semble en bon état.

2. Réflexions sur le choix d'introduction de SAB

De ces résultats de bilans environnementaux, différents éléments émergent apportant certaines réflexions quant à la décision d'introduire des SAB sur des zones d'implantation d'éoliennes. Ces éléments prennent en compte l'évaluation de l'état de la zone par rapport à l'état de référence et des mesures supplémentaires liées aux impacts du parc.

Pour l'introduction	Contre l'introduction
<ul style="list-style-type: none">• Certains peuplements clés de l'état de référence sont endommagés sur une ou plusieurs zones du parc. Si les pressions liées à ces activités ont été réduites ou sont plus faibles, l'ajout de SAB pourrait être bénéfique.• Les mesures pour la réduction de l'incidence de certains impacts ne sont pas suffisantes pour un retour à un état proche de l'état de référence	<ul style="list-style-type: none">• La variabilité de biomasse et de richesse des espèces par rapport à l'état de référence est trop importante• Les distributions spatiale et temporelle qu'elles soient hétérogènes ou homogènes sont stables et/ou proche de l'état de référence• Les mesures pour la réduction de l'incidence de certains impacts sont suffisantes pour un retour à un état proche de l'état de référence

V. Conclusion

Les types de SAB actuelles autour des éoliennes restent encore limitées mais se différencient en deux sortes : posées sur fonds et fixées dans la colonne d'eau.

Notre étude a permis de développer, pour de futures mises en place de SAB, des préconisations générales portant sur : (i) le design et la localisation interne dans le parc ; (ii) la logistique et l'installation de la solution, (iii) la limitation de la sélection génétique ; (iv) la caractérisation écologique ; (v) les espèces parasites et invasives. De plus, de futures thématiques ont été proposées dans le développement de l'utilisation de SAB au sujet : (i) du design et de la localisation interne ; (ii) de la caractérisation écologique et de la pyramide écologique et (iii) des liens à l'échelle d'un parc éolien.

Certaines limites de notre étude ont pu être observées. La sélection du nombre de projets pilotes de SAB a été difficile compte tenu du faible nombre de retours publiquement disponibles. Ces études se focalisent majoritairement sur de la valorisation d'habitats récifaux (récifs d'huitres ou enrichissement coquiller) en mer du Nord – où plusieurs parcs de pays différents sont localisés (Pays-Bas Danemark, au Royaume-Uni) – et dans le golfe du Lion en Méditerranée (France).

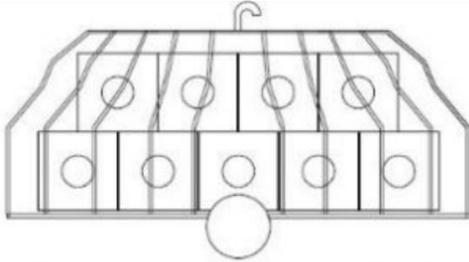
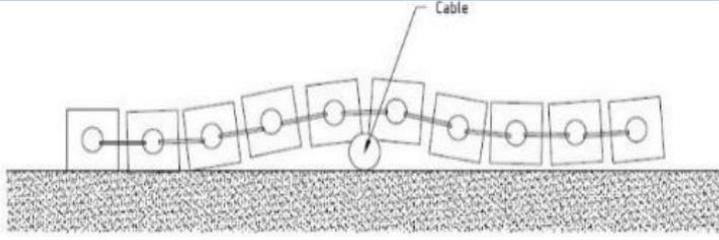
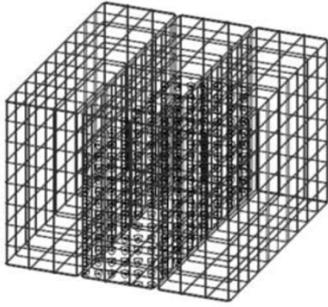
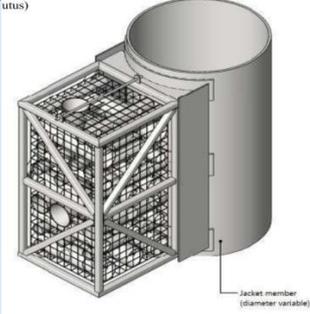
Le déploiement de SAB est encore un dispositif précurseur et l'augmentation de biodiversité locale reste difficile à évaluer en raison des changements de biodiversité naturels et induits par l'introduction d'éoliennes sur zone. Il reste des incertitudes sur le fait que l'ajout de SAB puisse améliorer la biodiversité locale autour des éoliennes en mer. L'augmentation de biodiversité liée à la mise en place de SAB nécessite une comparaison avec des zones contrôles non équipées. Au contraire, l'ajout de SAB peut accentuer les changements de communautés par rapport à l'état de référence.

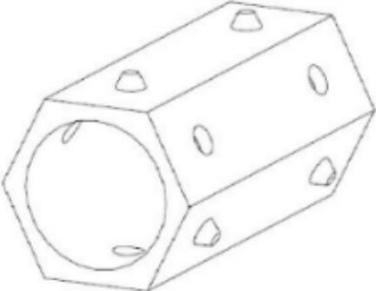
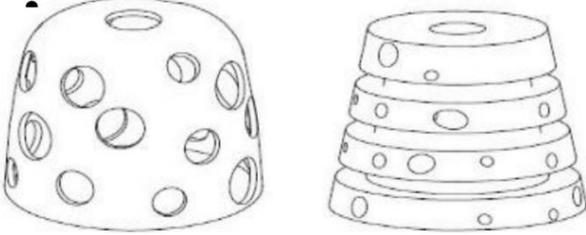
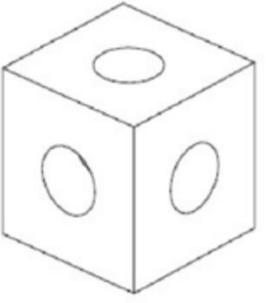
Des éléments d'aide à la décision d'introduire ou non des SAB sur zone d'implantation ont également été établis à partir des bilans environnementaux du parc de Saint Briec. L'état de référence et les impacts environnementaux retenus permettent d'élaborer ces éléments. Des éléments comme la stabilité des paramètres de biodiversité locale ou l'efficacité des mesures de réduction d'incidence d'impacts peuvent justifier l'aspect superflu de l'ajout de SAB. Seuls les bilans environnementaux d'un seul parc éolien en mer ont été analysés. Il serait intéressant de confronter ces éléments à l'échelle de l'ensemble des parcs éoliens en mer français.

Actuellement, des projets de design de protection contre affouillements sont en cours avec pour objectifs la possibilité d'améliorer la biodiversité au sein de parcs éoliens (Wageningen University and Research, 2023). Des projets d'études sont en développement autour du rôle des zones d'énergies renouvelables marines dans l'amélioration de la biodiversité (Scottish Marine Environmental Enhancement Fund, 2023).

Annexe

Solution	Catégorie	Visuel
Couche de pierres additionnelles	Protection d'affouillements	
Couche de protection adaptée nivelée	Protection d'affouillements	
Filter Unit® (Rockbags)	Protection de câble	
Basaltbags	Protection de câble	
ECO Mats®	Protection de câble	

Solution	Catégorie	Visuel
<i>Reef cube® filter bag™</i>	Protection de câble	
<i>Reef cube® mattresses™</i>	Protection de câble	
<i>Biohut®</i>	Structures additionnelles intégrées au design de sous-stations ou éoliennes	
<i>Cotel;Eotel; Sqotel</i>	Structures additionnelles intégrées au design de sous-stations ou éoliennes	
<i>Tube pour habitats</i>	Structures artificielles unités distinctes autour d'éoliennes ou sous- stations	

Solution	Catégorie	Visuel
<i>Hôtel pour poissons</i>	Structures artificielles distinctes unités autour d'éoliennes ou sous-stations	
<i>Reefball® and Layer cakes</i>	Structures artificielles distinctes unités autour d'éoliennes ou sous-stations	 <p data-bbox="699 837 906 860">REEFBALL 3D VIEW</p> <p data-bbox="1023 837 1273 860">LAYER CAKES 3D VIEW</p>
<i>Reefcube®</i>	Structures artificielles distinctes unités autour d'éoliennes ou sous-stations	
<i>3D printed units</i>	Structures artificielles distinctes unités autour d'éoliennes ou sous-stations	

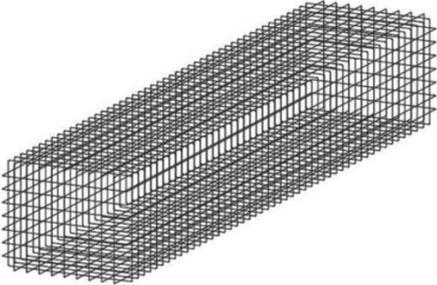
Solution	Catégorie	Visuel
<i>ECO armour block®</i>	Structures artificielles distinctes autour d'éoliennes ou sous-stations	
<i>Oyster gabions</i>	Structures artificielles distinctes autour d'éoliennes ou sous-stations	

Table 1 Solutions d'augmentation de biodiversité pour les éoliennes en mer et sous-stations incluant de l'éco-conception d'après (Blue Marine Foundation, MRAG, 2023)

VI. Références

- Ailes Marines. (2023a). *Parc éolien de la baie de Saint-Brieuc Bilan environnemental de la phase de pré-construction*. Eoliennes en Mer. Récupéré sur <https://www.eoliennesenmer.fr/sites/eoliennesenmer/files/fichiers/2023/05/STB-DWF-CON-REP-AMS-004551%20Bilan%20environnemental%20pr%C3%A9%20construction.pdf>
- Ailes Marines. (2023b). *Bilan Environnemental Première Année de Construction*. Eoliennes en Mer. Récupéré sur <https://www.eoliennesenmer.fr/sites/eoliennesenmer/files/fichiers/2023/06/STB-DWF-CON-REP-AMS-004496%20Bilan%20environnemental%202021.pdf>
- Akhtar, N., Geyer, B., & Schrum, C. (2022). Impacts of accelerating deployment of offshore windfarms on near-surface climate. *Nature*, 16.
- Ashley, M. C., Mangi, S. C., & Rodwell, L. D. (2014). The potential of offshore windfarms to act as marine protected areas – A systematic review of current evidence. *Marine Policy*(45), 301–309. doi:10.1016/j.marpol.2013.09.002
- Benayas, J. M., Newton, A. C., Diaz, A., & Bullock, J. M. (2009). Enhancement of Biodiversity and Ecosystem Services by Ecological Restoration: A Meta-Analysis. *Science*, 325, 1121-24. doi:10.1126/science.1172460
- Bernard, G., Janson, A., Gremare, A. G., Labrune, C., & Guérin, L. (2018). *Évaluation de l'atteinte du BEE des habitats benthiques Rapport scientifique pour l'évaluation 2018 au titre des descripteurs 1 et 6 de la DCSMM (critères D6C4 et D6C5)*. CNRS, EPOC, IUEM/UBO, UMS PatriNat. Récupéré sur https://www.dirm.sud-atlantique.developpement-durable.fr/ex.ouv.fr/IMG/pdf/02_b_annexe_2b-p3_a_14.pdf
- Blue Marine Foundation, MRAG. (2023). *Opportunities for nature recovery within UK offshore wind farms GB3003 Final Report*. London: Blue Marine Foundation. Récupéré sur https://www.blumarinefoundation.com/wp-content/uploads/2024/01/Opportunities-for-nature-recovery-within-UK-offshore-wind-farms_Final-Report-2.pdf
- Bos, O. G., Kamermans, P., Tonk, L., Schutter, M., Maathuis, M., Gool, A. v., . . . Sas, e. H. (2023). *Eco-friendly reef restoration pilots in offshore wind farms Wageningen Marine Research report C032/23*. Den Helder: Wageningen Marine Research, Waardenburg Ecology, Deltares, Sas Consultancy. Récupéré sur <https://tethys.pnnl.gov/sites/default/files/publications/Bos-et-al-2023.pdf>
- CNDP. (2021). *Projet Eolien en Mer en Sud Atlantique - Les impacts environnementaux génériques d'un parc éolien en mer et de son raccordement*. Récupéré sur https://www.debatpublic.fr/sites/default/files/2021-09/2021-09_Eolien_mer_Sud_Atlantique_DMO_Fiche16-01.pdf
- Comité Régional de la Conchyliculture (CRC), IFREMER. (2021). *Projet FOREVER (Flat Oyster Recovery) : Restauration écologique de l'huître plate en Bretagne*. Brest, Quiberon: Génie Ecologique Centre de Ressources. Récupéré sur https://www.genieecologique.fr/sites/default/files/documents/rex/3_rex_forever_restoration_huitre_plate_bretagne_v5.pdf

- Daewel, U., Akhtar, N., Christiansen, N., & Schrum, C. (2022). Offshore wind farms are projected to impact primary production and bottom water deoxygenation in the North Sea. *Nature*, 8.
- Degraer, S., Brabant, R., Rumes, B., & Vigin, L. (2021). *Environmental Impacts of Offshore Wind Farms in the Belgian Part of the North Sea: Attraction, avoidance and habitat use at various spatial scales. Memoirs on the Marine Environment*. Brussels: Royal Belgian Institute of Natural Sciences, OD Natural Environment, Marine Ecology . Récupéré sur https://tethys.pnnl.gov/sites/default/files/publications/winmon_report_2021_final.pdf
- Didderen, K., Bergsma, J., & Kamermans, P. (2019). *Offshore flat oyster pilot Luchterduinen wind farm : Results campaign 2 (July 2019) and lessons learned Report no.19-184*. Bureau Waardenburg, Culemborg: Bureau Waardenburg . Récupéré sur <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/519765>
- Ecocean. (2024). *Projet CONNEXSTERE*. Récupéré sur Ecocean: <https://www.ecocean.fr/projets-ecocean/projet-connexstere/>
- Ecocean; Agence de l'Eau Rhone Méditerranée Corse. (2021). Faune vagile et poissons : quelle biodiversité et quelles relations entre la lagune, la côte et le large ? Résultats du projet CONNEXSTERE. *Projet CONNEXSTERE*, (p. 27). Leucate. Récupéré sur https://rivage-salses-leucate.org/wp-content/uploads/2021/10/6_ConnexLaguneMer_AnaisGudefin.pdf
- Farias Pardo, J. C., Aune, M., Harman, C., Walday, M., & Figenschau, S. (2023). A synthesis review of nature positive approaches and coexistence in the offshore wind industry. *ICES Journal of Marine Science*, 1-17. Récupéré sur <https://uia.brage.unit.no/uia-xmlui/bitstream/handle/11250/3106791/Article.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- Glarou, M., Zrust, M., & Svendsen, J. C. (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 Engineering*, 8(332), 25 pp. doi:10.3390/jmse8050332
- Jetz, W., McGeoch, M., Guralnick, R., & al, e. (2019). Essential biodiversity variables for mapping and monitoring species populations. *Nature Ecology & Evolution*, 3, 539-551. doi:<https://doi.org/10.1038/s41559-019-0826-1>
- Lenfant, P., & DRIVER. (2024). Restauration Ecologique des Petits Fonds Marins Côtiers Définitions. *Formation RestauMER Session 2024* (p. 81). Montpellier: Réseau DRIVER.
- Li, C., Mogollón, J. M., Tukker, A., & Steubing, B. (2022). Environmental Impacts of Global Offshore Wind Energy Development until 2040. *Environmental Science & Technology*, 11567-115777.
- Orsted. (2023, 06 20). *Ørsted et le WWF se lancent dans un projet de restauration marine en mer du Nord danoise pour contribuer à la biodiversité des océans*. Récupéré sur News & Media: <https://orsted.com/en/media/news/2023/06/orsted-and-wwf-embark-on-marine-restoration-project-in-the-danish-north-sea>
- Parlement Européen. (2021, 12 6). *RAPPORT A9-0339/2021 sur une stratégie européenne pour l'énergie marine renouvelable*. Récupéré sur https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/A-9-2021-0339_FR.html
- Robertson, M., Locke, S., Uttley, M., & Hammerson, K. (2021). *Exploring the role of offshore wind in restoring priority marine habitats Case Study Opportunities for native oyster Ostrea edulis*

- restoration at the Gunfleet Sands Offshore Wind Farm*. Colchester, UK: Blue Marine Foundation. Récupéré sur https://www.researchgate.net/publication/348742021_Exploring_the_role_of_offshore_wind_in_restoring_priority_marine_habitats_Case_Study_Opportunities_for_native_oyster_Ostrea_edulis_restoration_at_the_Gunfleet_Sands_Offshore_Wind_Farm
- RTE, Départements du Finistère et du Morbihan. (2020). *Analyse bibliographique environnementale pour Projet d'éoliennes flottantes au sud de la Bretagne*. Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire. Récupéré sur https://www.eoliennesenmer.fr/sites/eoliennesenmer/files/fichiers/2021/08/ANALYSE_BIBLIO_AO5_VF-1.pdf
- Sas, H., van der Have, T., Kamermans, P., & Lengkeek, W. (2018). *Flat oyster pilot design in Luchterduinen offshore wind farm*. Sas Consultancy; Bureau Waardenburg; Wageningen Marine Research. Récupéré sur <https://life-ip-deltanatuur.nl/file/download/217771ba-c236-4e94-8a9e-d199e8151a46/158746426120180705%20def%20flat%20oyster%20pilot%20design%20luchterduinen.pdf>
- Scottish Marine Environmental Enhancement Fund. (2023). *Nature Enhancement at Marine Offshore Energy Sites : 'NEMOES'*. Récupéré sur Scottish Marine Environmental Enhancement Fund: <https://smeef.scot/projects/nature-enhancement-at-marine-offshore-energy-sites-nemoes/>
- Sécritariat Chargé de la Mer et de la Biodiversité. (2022). *Annexe 2b : Évaluation de l'état écologique du milieu marin et des pressions exercées*. Direction Interrégionale de la mer Sud-Atlantique. Récupéré sur <https://www.dirm.sud-atlantique.developpement-durable.gouv.fr/annexe-2b-evaluation-de-l-etat-ecologique-du-a1373.html?lang=fr>
- Sécritariat d'Etat chargé de la Mer. (2023, 08). *Stratégie Nationale Mer et Littoral 2030 Version Projet*. Récupéré sur https://mer.gouv.fr/sites/default/files/2023-08/SNML%20DOC%20A4-WEB-PAGE-BD-ok_compressed.pdf
- SER. (2010). *International Primer on Ecological Restoration: Note by the Executive Secretary. Information note submitted to the Secretariat of the Conference on Biodiversity, Subsidiary Body on Scientific, Technical and Technological Advice, Fourteenth meeting*. Nairobi: SER. Consulté le May 10-21, 2010, sur <https://www.cbd.int/doc/meetings/sbstta/sbstta-14/information/sbstta-14-inf-15-en.pdf>
- The Crown Estate; ABP Mer. (2021). *Strategic Net Gain Targets for Coastal and Marine Environments Task and Finish Group Final Report*. UK: Offshore Wind Evidence + Change Programme. Récupéré sur <https://www.marinedataexchange.co.uk/details/TCE-3513/2021-strategic-net-gain-task-and-finish-group-offshore-wind-evidence-and-change-programme-strategic-net-gain-targets-for-coastal-and-marine-environments#data-highlights>
- Wageningen University and Research. (2023). *BENSO: Scour protection design for biodiversity enhancement in North Sea offshore wind farms*. Récupéré sur Wageningen University and Research: <https://www.wur.nl/en/research-results/research-funded-by-the-ministry-of-Lnv/soorten-onderzoek/kennisonline/benso-3.htm>