diverseaty

EFFETS ET IMPACTS DES PARCS EOLIENS EN MER SUR L'ICHTYOFAUNE ET LES POPULATIONS ASSOCIEES

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE DES SUIVIS ECOLOGIQUES DES PARCS EOLIENS OPERATIONNELS ET CONTEXTE DU PARC EOLIEN EN MER DU CALVADOS

N° SIRET : 89110180000011

www.diverseaty.fr

Parc éolien en mer du Calvados

EFFETS ET IMPACTS DES PARCS EOLIENS EN MER SUR L'ICHTYOFAUNE ET LES POPULATIONS ASSOCIEES

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE DES SUIVIS ECOLOGIQUES DES PARCS EOLIENS OPERATIONNELS ET CONTEXTE DU PARC EOLIEN EN MER DU CALVADOS

Maitre d'ouvrage :	Eoliennes offshore du calvados
Rédacteur :	Mehdi DERNOUNY
Référence du document :	DERNOUNY, M. (2022). Effets et impacts des parcs éoliens en mer sur l'ichtyofaune et les populations associées. Synthèse bibliographique des suivis écologiques des parcs éoliens opérationnels et contexte du parc éolien en mer du Calvados. Eoliennes offshore du calvados ; 87p.
Version :	VF05/07/2022
N° contrat :	20210623

diverseaty
N°SIRET : 89110180000011
N° TEL : 07 49 50 55 48
e-mail : contact@diverseaty.fr

Table des matières

1. INTRODUCTION 1

2. METHODOLOGIE 3

2.1. RECHERCHE DOCUMENTAIRE 3

2.2. EFFETS OU IMPACTS ? 3

2.3. DESCRIPTION DES DONNEES RECOLTEES 5

3. LES EFFETS DES PARCS EOLIENS OFFSHORES ET IMPACTS SUR L'ICHTYOFAUNE ET LES POPULATIONS ASSOCIEES 7

3.1. EFFET ACOUSTIQUE 7

3.1.1. GENERALITES 7

3.1.2. L'EFFET ACOUSTIQUE DANS LE CONTEXTE DES PARCS EOLIENS OFFSHORES 11

3.1.3. QU'OBSERVE-T-ON SUR LES PARCS EOLIENS EN FONCTIONNEMENT ? 19

3.2. EFFET TURBIDE 25

3.2.1. GENERALITES 25

3.2.1. L'EFFET TURBIDE DANS LE CONTEXTE DES PARCS EOLIENS OFFSHORES 27

3.2.1. QU'OBSERVE-T-ON SUR LES PARCS EOLIENS EN FONCTIONNEMENT ? 33

3.3. EFFET RECIF ARTIFICIEL 35

3.3.1. GENERALITES 35

3.3.2. L'EFFET RECIF DANS LE CONTEXTE DES PARCS EOLIENS OFFSHORES 37

3.3.3. QU'OBSERVE-T-ON SUR LES PARCS EOLIENS EN FONCTIONNEMENT ? 43

3.4. EFFET RESERVE 53

3.4.1. GENERALITES 53

3.4.1. L'EFFET RESERVE DANS LE CONTEXTE DES PARCS EOLIENS OFFSHORES 53

3.4.2. QU'OBSERVE-T-ON SUR LES PARCS EOLIENS EN FONCTIONNEMENT ? 57

3.5. EFFET DES CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES 61

3.5.1. GENERALITES 61

3.5.2. L'EFFET CEM DANS LE CONTEXTE DES PARCS EOLIENS OFFSHORES 67

3.5.3. QU'OBSERVE-T-ON SUR LES PARCS EOLIENS EN FONCTIONNEMENT ? 71

3.6. CONCLUSIONS 75

BIBLIOGRAPHIE 79

Figures

Figure 1: Matrice d'évaluation des impacts (méthode InVivo)..... 4
Figure 2: Caractéristiques des suivis écologiques de la ressource halieutiques opérés dans plusieurs pays d'Europe du Nord. 5
Figure 3: Synthèse des niveaux à la source et des fréquences associées des principales sources de bruit anthropique [46]..... 7
Figure 4 : Emprunte acoustique d'un parc éolien au cours des études préalables, de la construction, du fonctionnement et du démantèlement [53] 11
Figure 5: Niveau d'exposition sonore large bande attendus à 750m [17] 12
Figure 6: Empreinte sonore de chaque scenario[17] 12
Figure 7: Niveaux de pression acoustique mesurés à différentes distances de turbines en fonctionnement et de navires [47] 13
Figure 8: Niveaux d'exposition sonore médiane (dB re 1µPa²s) calculés pour une distance de 750 mètres du point considéré [16]. 14
Figure 9: Empreinte sonore du parc en exploitation[16] 14
Figure 10: Empreinte sonore du parc soumis à de la maintenance[16] 14
Figure 11: Rideau de bulles (photo: Trianel GmbH/Lang) et mesure de l'efficacité de réduction du bruit lors de la construction du parc de Borkum West II [69] 15
Figure 12: Estimation des impacts du bruit sur la ressource halieutique dans plusieurs parcs éoliens offshores [9,67,74–83] 17
Figure 13 : Evaluation initiale des impacts du bruit sur la ressource halieutique dans le cadre du projet éolien offshore de Courseulles-sur-Mer.....18
Figure 14: Mesure de suivi de la ressource halieutique et de l'ichtyofaune-Projet du parc éolien en mer du Calvados (Fiche n°SU6). 20
Figure 15: Sites pilotes du programme FISHINTEL.....22
Figure 16: Sites pilotes retenus dans le cadre du programme FISHOWF.....24
Figure 17: Dépôt maximal atteint pendant les 2 jours de simulation en marée de vive-eau moyenne(C95, en mm) pour un rejet débutant au flot (en haut) et au jusant (en bas).[18]. 28
Figure 18: Estimation des impacts de l'effet turbide sur la ressource halieutique dans plusieurs parcs éoliens offshores [9,67,74–83] 31
Figure 19 : Evaluation des impacts de l'effet turbide sur la ressource halieutique dans le cadre du projet éolien offshore de Courseulles-sur-Mer[16] 32
Figure 20: de gauche à droite : structure en acier pour l'accrétion electrominérale, épave (photos M.Dernouny) 35
Figure 21: Principe d'une fondation de type monopieux et de sa pièce de transition[16] 38
Figure 22: Caractéristiques des fondations monopieux(valeurs indicatives) 38
Figure 23: colonisation sur et autour du mât de mesure de Fécamp 39
Figure 24: Estimation des impacts de l'effet récif sur la ressource halieutique dans plusieurs parcs éoliens offshore [9,67,74–83] 41
Figure 25 : Evaluation des impacts de l'effet récif sur la ressource halieutique dans le cadre du projet éolien offshore de Courseulles-sur-Mer 42
Figure 26: Illustration de de la colonisation des fondations des turbines par les organismes marins. Dessin par Hendrik Gheerardyn [in 11] 45
Figure 27: Banc de jeunes merlans se nourrissant de l'amphipode tubicole Jassa falcata sur le parc éolien de North Hoyle (RU). (Photographie : npower renouvelables[in 123]).....49
Figure 28: Colonisation des fondations du parc éolien de Block Island (USA) par le bar noir (Centropristis striata) quatre ans après la construction [126] 51
Figure 29: Estimation des impacts de l'effet réserve sur la ressource halieutique dans plusieurs parcs éoliens offshores [9,67,74–83] 55
Figure 30: Représentation simple d'un câble HVDC sous-marin et des champs électromagnétiques émis [134,adapté de 139] 61
Figure 31: Schéma de raccordement d'un parc éolien posé (Source RTE) 67
Figure 32: Mesures du champ magnétique et du champs électrique induit sur plusieurs parcs éoliens [16] 67
Figure 33: Câble électrique sous-marin inter-éolien (à gauche en coupe, NSW ; à droite Draka).....68
Figure 34: Illustration des différentes configurations de câbles[149] 69
Figure 35: Estimation des impacts de l'effet CEM sur la ressource halieutique dans plusieurs parcs éoliens offshores [9,67,74–83] 69
Figure 36 : Evaluation des impacts de l'effet des champs électro-magnétiques sur la ressource halieutique dans le cadre du projet éolien offshore de Courseulles-sur-Mer..... 70

1. INTRODUCTION

Les énergies marines renouvelables contribuent à l'effort de réduction des émissions de carbone dans le monde. La technologie pour capter l'énergie du vent, du soleil et de la biomasse sont toutes à divers stades de développement[1]. La politique climatique actuelle et les enjeux de sécurité énergétique entraînent la construction de parcs éoliens à un rythme croissant pour répondre à la demande d'énergie [2]. Le développement des parcs éoliens offshores (OWF's) est actuellement la plus avancée de toutes les technologies de production d'énergie renouvelable en milieu marin. Cependant, malgré ses avantages perçus, la construction des parcs induira des impacts directs et indirects sur l'écosystème marin [3]. Il est donc nécessaire de mieux comprendre les effets de ces installations sur les écosystèmes marins côtiers [4].

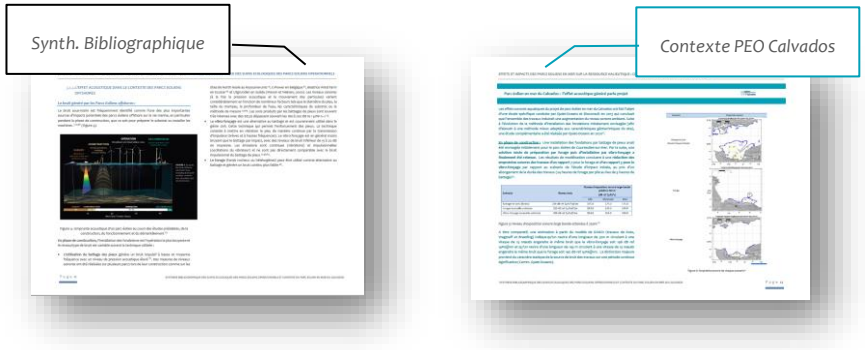
La base mondiale de connaissances scientifiques associées aux effets environnementaux des parcs éoliens offshore a été guidée par les pays d'Europe du Nord depuis plus de deux décennies. Au début des années 2000, le Danemark a initié la collecte de données environnementales et fut rapidement rejoint par quatre autres pays – la Belgique, l'Allemagne, les Pays-Bas et le Royaume-Uni – qui possèdent aujourd'hui le plus grand nombre d'installations opérationnelles (25 GW, 5290 éoliennes offshore) [5–7]. Depuis 2006-2008, l'effort de recherche au niveau européen/mondial a significativement augmenté. Les programmes de surveillance Danois, Néerlandais, Britannique, Allemand et Belge ont produit une connaissance scientifique sans précédent sur les effets des parcs éoliens offshore sur le milieu marin, couvrant un large éventail d'impacts potentiels et de composantes écosystémiques (ressources halieutiques, faune benthique, mammifères marins, oiseaux…) [6,8,9].

Sur la plupart des parcs éoliens offshore opérationnels, des suivis écologiques ont été conduits à plus ou moins long-terme afin d'évaluer les impacts sur l'écologie des poissons et des invertébrés [10].

Ce document propose, dans le contexte du projet de parc éolien en mer du Calvados, une synthèse bibliographique des effets génériques des parcs éoliens offshore (en phase de construction et de fonctionnement), de leurs impacts potentiels (anticipés par la communauté scientifique et dans les études d'impacts), sur la ressource halieutique (au sens large du terme, c'est-à-dire qu'elles soient exploitées ou non) et des enseignements apportés par les suivis réalisés sur plusieurs parcs éoliens opérationnels.

La forme du document *présente en vis-à vis, les éléments relatifs à la synthèse bibliographique générale (**pages de gauche**) et les éléments contextuels du projet du parc éolien en mer du Calvados (**pages de droite avec un bandeau bleu**).*

Ainsi, en face de chaque page de la synthèse bibliographique, sont rapportés les éléments de contexte du Parc éolien en mer du Calvados sur le même thème :



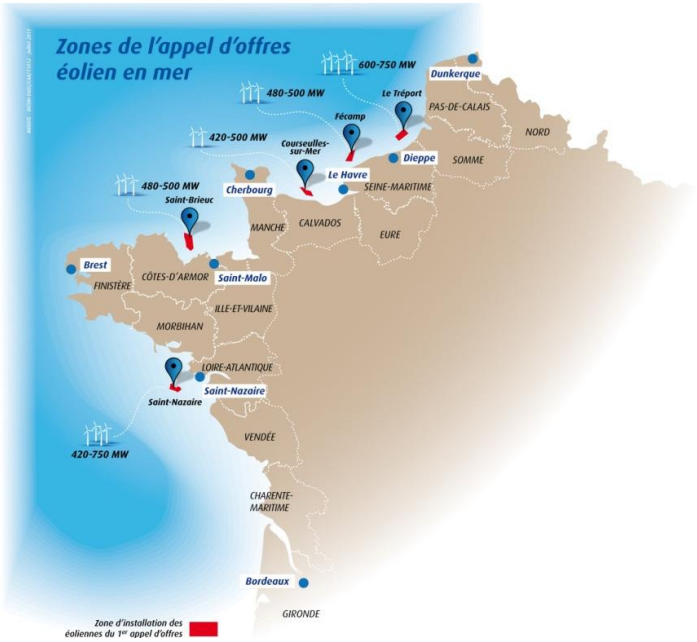
Il est nécessaire d'afficher le document en doubles pages comme dans un livre, c'est pourquoi, il est conseillé d'opter pour une version papier.

La version numérique *est paramétrée pour une ouverture en doubles pages. Dans le cas contraire, il est nécessaire d'activer ce mode d'affichage dans le lecteur PDF :*

*(Dans Acrobat Reader DC ©: Affichage > Affichage de page > Deux pages **ET** Affichage > Affichage de page > afficher la page de couverture en mode deux pages).*

Parc éolien en mer du Calvados : présentation du projet

L'État a lancé, le 11 juillet 2011, le premier appel d'offres éolien offshore portant sur 3 000 mégawatts répartis sur cinq zones, définies à l'issue d'un processus de concertation : Le Tréport, Fécamp, Courseulles-sur-Mer, Saint-Brieuc et Saint-Nazaire.



Le projet de parc éolien en mer du Calvados, porté par le consortium Éolien Maritime France (regroupant la société EDF EN France et DONG Energy Wind Power) est un des quatre projets finalement retenus à l'issue du premier appel d'offres. Éolien Maritime France a constitué une société de projet pour la réalisation du parc éolien au large de Courseulles-sur-Mer, dénommée **Éoliennes Offshore du Calvados**.

Les principales caractéristiques du futur parc sont les suivantes :

- 64 éoliennes en mer
- Une puissance totale de ~450 mw.
- Les éoliennes seront localisées à plus de 10 km des côtes du Bessin, sur une surface globale de 50 km².
- La production envisagée équivaut à couvrir l'équivalent de la consommation domestique en électricité de près de 630 000 personnes, soit plus de 90% des habitants du Calvados.

Le projet de parc éolien en mer du Calvados a fait l'objet d'un débat public du 20 mars au 20 juillet 2013. Il a été autorisé par arrêté préfectoral le 8 juin 2016 sur la base du dossier de demande déposé le 23 octobre 2014 et complété le 10 décembre 2014.

2. METHODOLOGIE

2.1. RECHERCHE DOCUMENTAIRE

Une première phase de recherche de ressources de références a été réalisée sur différents supports de publications existants (moteurs de recherche génériques et spécialisés, archives et dépôts en ligne, sites institutionnels). Un certain nombre de mots clés en anglais (couplés les uns aux autres) ont été déterminés afin de cibler les publications pertinentes au regard du sujet : *offshore wind parc (souvent indiqué par OWF), long term, effects, impacts, fish, fisheries, crustaceans, shellfish, noise, EMF (ElectroMagnetic Field), turbidity, negative, positive*, etc. Une première analyse des résultats a permis d'identifier les communautés de référence (chercheurs, laboratoires, institutions, parcs éoliens) utilisées par la suite comme mots clés pour compléter la recherche.

Une deuxième phase de classement de la littérature résultante (plus de 100 articles évalués par des pairs et rapports publiés jusqu'en 2021) a été réalisée en fonction du sujet de la publication : type de compartiments (poissons, mollusques, crustacés, faune benthique, pêcherie), localisation (par pays), type d'étude (empirique, synthèse bibliographique, modèle), type d'effet étudié (bruit, récif, champs électro-magnétiques, effet turbide etc.).

Une troisième phase de lecture/synthèse des différents ressources a été réalisée en priorisant les publications les plus récentes [e.g 11–13] et les plus pertinentes au regard du sujet.

Une quatrième et dernière phase de rédaction synthétique des différents résultats (incluant un court résumé dans chaque partie ainsi qu'un gros plan sur le parc éolien offshore du Calvados) a permis de finaliser le présent document.

2.2. EFFETS OU IMPACTS ?

Lorsque l'on s'intéresse aux perturbations anthropiques, il est important de distinguer les « effets » des « impacts ». [14,15].

Les effets sont des modifications de paramètres environnementaux (ou « facteurs de stress ») au-delà de la plage de variabilité naturelle, tels que le type de substrat, l'hydrodynamique, la température de l'eau, le bruit ou les champs électromagnétiques [14]. Ces caractéristiques de l'environnement peuvent changer avec la mise en œuvre des énergies renouvelables pendant l'installation, l'exploitation ou le démantèlement des installations. La dimension spatiale et temporelle, l'ampleur du stress, en termes de durée, fréquence et intensité doivent être pris en compte [1].

Les impacts correspondent aux changements observés au niveau des « récepteurs », c'est-à-dire les différents compartiments écosystémiques (biotopes, biocénose), ou niveaux (communautés, populations) ou processus écologiques au sein des écosystèmes marins (interactions trophiques, recrutement…) ou bien encore les activités humaines (pêche, navigation, etc.). Les impacts peuvent être qualifiés (positifs ou négatifs, bien que cette distinction reste subjective [14,15]) et quantifiés. Les compartiments récepteurs peuvent potentiellement répondre de manières diverses et variées aux facteurs de stress. [1].

En résumé :

Un effet est la cause et un impact sa conséquence sur les différentes composantes environnementales (le milieu physique, le milieu biologique et leurs interactions).

Parc éolien en mer du Calvados : méthodologie de l'étude d'impact

Dans le cadre de la demande d'autorisation au titre du code de l'environnement, une étude d'impact du projet de parc éolien en mer du Calvados[16] sur l'environnement a été produite. Par la suite, des compléments lui ont été apportés consécutifs à des modifications des aspects techniques du projet (méthode d'installation des fondations)[17,18]. **Les éléments relatifs au projet présentés dans ce rapport** sont principalement issus de ces documents.

La méthodologie utilisée dans l'étude d'impact est basée sur plusieurs guides institutionnels et présente[16] :

L'état initial de l'environnement : Il met en évidence les caractéristiques du site, sur la base de données bibliographiques d'une part et d'investigations in-situ d'autre part. L'objectif est d'évaluer les principaux enjeux/sensibilités environnementaux. Les enjeux sont présentés en quatre grandes parties (milieu physique, milieu vivant, patrimoine naturel/archéologique/paysager et milieu humain). De nombreuses études spécifiques ont été réalisées pour compléter les données bibliographiques (géotechnique, météo-océanique, océanographie physique, hydro-sédimentaire, acoustique, qualité du milieux, bio-sédimentaires etc.).

Des campagnes d'évaluation de l'ichtyofaune et de la ressource halieutique sur le site ont été lancées à partir de 2013. Basés sur le principe Before-After-Control-Impact (BACI), des échantillonnages ont été réalisés ou sont prévus avant/après installation et dans une zone potentiellement impactée et une zone non impactée de référence. Afin de couvrir les principaux assemblages saisonniers, chaque campagne prévoie :

- ✓ 24 traits de chalut Canadien
- ✓ 14 calées de filets trémails

Analyse des effets : Les effets du projet ont été évalués sur les thématiques développées dans l'état initial et ont été traités selon les différentes phases du projet puis hiérarchisés (positifs/négatifs, direct/indirect, durée, degré).

Détermination des impacts : Les impacts ont été définis en croisant l'effet et la sensibilité de chaque compartiment. Pour une hiérarchisation claire de l'impact, il a été donné, un « poids » plus fort à la sensibilité par rapport à l'effet. Dans des cas exceptionnels, cette méthodologie a pu ne pas être appliquée (lorsque l'impact est fonction des périodes de travaux pour la construction par exemple).

Effet \ Sensibilité	Nulle ou Négligeable	Faible	Moyenne	Forte
Nul ou Négligeable	Nul	Nul	Nul	Nul
Faible	Nul	Faible	Moyen	Moyen
Moyen	Nul	Faible	Moyen	Fort
Fort	Nul	Moyen	Moyen	Fort

Figure 1: Matrice d'évaluation des impacts (méthode InVivo).

Définition de mesures ERC et de suivi : Il s'agit de mesures prises par le maître d'ouvrage pour éviter, réduire ou compenser les effets négatifs notables du projet sur l'environnement ou la santé humaine. Les effets négatifs notables correspondent aux impacts forts. Des mesures ERC ont été également prévues pour des impacts non notables mais pouvant être atténués. Des mesures de suivi ont enfin été proposées afin de suivre l'efficacité des mesures ERC mises en œuvre et dans certains cas d'améliorer les connaissances (sans qu'il y ait pour autant un impact notable et une mesure de réduction associée). Ces suivis sont basés sur le protocole Before-After-Control-Impact (BACI).

2.3. DESCRIPTION DES DONNEES RECOLTEES

L'éventail des publications récoltées au cours de ce travail de synthèse peut être classé en quatre grandes catégories :

1/ Les travaux et publications scientifiques analysant les effets produits par les parcs éoliens en mer comme, par exemple, l'intensité du bruit, de la turbidité ou des champs électromagnétiques générés par les installations [19,e.g 20,21].

2/ Les travaux et publications scientifiques analysant individuellement les impacts de différents facteurs de stress sur les poissons et la macrofaune benthique comme, par exemple, les impacts des champs électromagnétiques ou du bruit sur les organismes marins [e.g 22–25].

3/ Les revues bibliographiques synthétisant les connaissances publiées par les chercheurs et les scientifiques [10,26,27,e.g 28,29].

4/ Les publications de synthèses et résultats des études d'impacts environnementales, suivis écologiques et programmes de surveillance menés sur les premiers parcs éoliens offshore comme, par exemple, les suivis halieutiques ou bio sédimentaires [8,11,12,30–32]. Ces suivis sont basés, pour la plupart, sur une méthode de type BACI (Before–After–Control–Impact). Celle-ci consiste à comparer les zones potentiellement impactées avec des zones témoins (ou de référence) et ce avant, pendant et après la construction des installations éoliennes [33]. Le tableau suivant, adapté de l'analyse d'Allen [5] présente les caractéristiques des suivis menés dans plusieurs pays :

Pays	Puissance (2020)	Suivi écologique	Méthode générale	Echantillonnage Ressource halieutique	Exemple de source bibliographique
Royaume-Uni	8 GW répartis sur plus de 30 parcs éoliens	• 3 ans avant la construction • 3 ans après la construction	BACI	• Chalut à perche • Engins pêche professionnelle • Vidéo • …	31,34,35
Allemagne	6 GW répartis sur plus de 20 parcs éoliens	Premier projet suivi de manière intensive (Alpha Ventus) • 2 ans avant la construction • Pendant la construction • Jusqu'à 5 ans après la construction	BACI	• Chalut à perche • Vidéo • Suivi sur les fondations • …	32,36,37
Danemark	1,5 GW répartis sur plus de 15 parcs éoliens	Les deux premiers projets ont été suivis de manière intensive (Horn Rev/Nysted). • 2 ans avant la construction • Pendant la construction • Jusqu'à 7 ans après	BACI	• Chalut • Drague • Vidéo/photo • …	38,39
Belgique	2.2 GW répartis sur 7 parcs éoliens	• 2/3 ans avant la construction, • Pendant la construction • Jusqu'à 10 ans après	BACI + Expérimentale	• Chalut à perche • Photo/vidéo • Cages • …	30,40–43

Figure 2: Caractéristiques des suivis écologiques de la ressource halieutiques opérés dans plusieurs pays d'Europe du Nord.

Parc éolien en mer du Calvados : présentation synthétique de l'état initial de la ressource halieutique

Campagnes d'échantillonnage réalisées pour l'élaboration de l'état initial de l'étude d'impact du projet :

Ichtyofaune et populations associées : Les campagnes d'échantillonnages menées lors de l'état initial ont identifié la présence de 67 espèces dans les captures au chalut et de 27 espèces dans les filets. De plus faibles richesses sont observées en été pour les 2 engins. Au niveau spatial, aucune différence significative n'est établie sur la zone d'étude. Au chalut, la dorade grise est constante (présente dans 89 % des traits) durant l'année. Le callionyme lyre, le tacaud commun, le petit tacaud, le chinchard et l'étrille sont communs (plus de 50 % des traits). La dorade grise, le tacaud commun, le merlan, le petit tacaud et l'encornet dominent les effectifs de poissons bentho-démersaux. Chez les poissons pélagiques, les clupéidés (juvéniles indifférenciés, hareng et sprat sont les plus nombreux dans les captures du chalut. Aux filets, la sole, le tacaud commun, la petite roussette, la plie, le tourteau et l'araignée sont capturés de façon constante (dans plus de 80 % des calées). L'émissole tachetée, la limande, la coquille Saint-Jacques et le buccin sont communs (présents dans plus de 50 % des calées). La petite roussette, le tacaud commun, la limande et la sole sont les espèces les plus capturées en termes d'effectifs. De fortes captures de maquereaux sont constatées lors de la campagne d'hiver.

Parmi les espèces capturées, 4 sont considérées comme menacées ou en déclin par la convention OSPAR (la raie bouclée, la raie douce, l'hippocampe et l'alose feinte). Cette dernière (2 individus capturés lors de cette étude) fait partie des espèces Natura 2000 classées comme vulnérables.

Espèces d'intérêt commercial : Ces investigations ont identifié 25 espèces de poissons, 4 espèces de crustacés et 6 espèces de mollusques d'intérêt commercial. Mis à part le chinchard et le maquereau, espèces marines pélagiques (les inventaires n'ont pas ciblé ces espèces), la ressource capturée est composée d'espèces marines bentho-démersales. La dorade grise est la seule espèce constante dans les captures du chalut. L'émissole, la plie, le turbot, la sole, le tacaud, le tourteau et l'araignée sont les espèces constantes dans les captures au filet.

IFREMER a réalisé en 2013, une étude sur la population de coquilles St-Jacques (*Pecten maximus*) présente sur le site éolien de Courseulles-sur-Mer – (État moyen de la ressource sur la période 1992-2012). Une biomasse exploitable moyenne de 336 tonnes (comprise pour un intervalle de confiance à 95% entre des valeurs minimale et maximale de 284 et 399 tonnes) a été estimée sur le site d'implantation. Cette biomasse correspond à 4,1% de la biomasse exploitable moyenne de l'ensemble du gisement classé de la baie de Seine.

Concernant les ressources halieutiques, la sensibilité est évaluée comme moyenne localement.

Fonctionnalités écologiques :

La baie de Seine est une zone de frai pour la seiche, la dorade grise et une zone de reproduction pour la coquille St-Jacques, le bulot et les crustacés. La baie de Seine est une zone de nourricerie importante pour de nombreuses espèces, en particulier dans les estuaires et sur la frange littorale. On y trouve notamment les juvéniles de la dorade grise, du petit tacaud, de la raie bouclée et du tacaud du bar, du merlan, de la sole et la de plie[16,44]. Le site d'implantation est éloigné des estuaires et du littoral mais potentiellement situé sur une zone de frai pour la sèche, la dorade grise et sur une voie de migration de larves ou juvéniles. Elle se situe également au niveau d'une zone où la coquille Saint-Jacques se reproduit, comme dans toute la baie de Seine. Concernant les aspects frayères et nourriceries, **la sensibilité est évaluée comme moyenne dans l'état initial de l'étude d'impact du projet.**

La baie de Seine est une zone fréquentée périodiquement par 5 espèces de poissons amphihalins (poissons migrateurs) : le saumon atlantique, la grande alose, l'alose feinte, la lamproie marine et la lamproie de rivière. Ces espèces sont inscrites à l'annexe II de la directive Habitat. Le site d'implantation ne semble pas être une zone où ces espèces sont présentes, aucune de ces espèces amphihalines n'a été observée au niveau du site d'implantation lors des deux premières campagnes de prélèvements. **La sensibilité de ces espèces est évaluée comme faible dans l'état initial de l'étude d'impact du projet.**

3. LES EFFETS DES PARCS EOLIENS OFFSHORES ET IMPACTS SUR L'ICHTYOFAUNE ET LES POPULATIONS ASSOCIEES

3.1. EFFET ACOUSTIQUE

3.1.1. GENERALITES

Qu'est-ce que l'effet acoustique ?

Le monde sous-marin n'est pas silencieux. Il existe un bruit de fond naturel qui provient de sources abiotiques et biotiques. Un large éventail de sons est également généré par l'homme dans le milieu marin. Les sources de sons anthropiques sont nombreuses (navigation, les dispositifs d'exploration sismique, activités de constructions, sonars actifs..) et sont susceptibles d'induire des impacts sur les organismes marins [45]. L'échelle des décibels est utilisée pour représenter les niveaux de bruit (échelle logarithmique ou l'énergie sonore double tous les 3db).

Type de signal	Source	Niveau d'émission[19] (dB re 1 µPa @ 1 m)	Bande de fréquence	Fréquences de maximum d'énergie	Durée	Directivité
Impulsionnel	Déroctage par explosif/minage	250-300	2 Hz-1 kHz	< 50 Hz	Qq ms à 100 s	Omnidir.
	Sismique (canon à air)	225-260	5 Hz-15 kHz	10-300 Hz (max<100 Hz)	10-100 ms	Faible (verticale)
	Sismique (boomer et sparker)	200-230	500 Hz-12 kHz	Variable	< 1 ms	Faible
	Battage de pieux	200-250	10 Hz-20 kHz	100-1 000 Hz	Qq ms	Omnidir.
	Sondeurs monofaisceaux	210-240	1-500 kHz	Variable	< 2 ms	Oui, verticale
	Sondeurs multifaisceaux	210-240	10-500 kHz	Variable	Qq ms	Oui, verticale
	ADCP	220-225	38-300 kHz	Variable	Qq ms	20°
	Sonars civils	200-240	> 10 kHz	Variable	< 1 s	Variable
	Pingers	130-200	5-160 kHz	Variable	< 2 s	Variable
Type de signal	**Source**	**Niveau de bruit spectral[19] (dB re 1 µPa/√Hz @ 1 m)**	**Bande de fréquence**	**Fréquences de maximum d'énergie**	**Durée**	**Directivité**
Continu	Supertanker	~ 190	1-10 kHz	40-70 Hz	-	Omnidir.
	Dragage	150-190	30 Hz-20 kHz	100-500 Hz	-	Omnidir.
	Forage	120-190	10 Hz-10 kHz	10-1 000 Hz	-	Omnidir.
	Navire de pêche (12 m de long, à 7 nd)	~ 150	10 Hz-20 kHz	100-2 000 Hz	-	Omnidir.
	Petit hors-bord (7 m de long)	~ 156	10 Hz-20 kHz	100-1 000 Hz	-	Omnidir.

Figure 3: Synthèse des niveaux à la source et des fréquences associées des principales sources de bruit anthropique [46]

Le bruit des turbines en action dans les parcs éoliens en mer en fonctionnement a été mesuré dans une récente étude (entre 81 et 137 dB re 1 µPa entre 0 et 1000 m de distance[47]). Non renseignés dans ce tableau, les engins de pêche trainants sont également une source de bruit non-négligeable comme le souligne une récente étude[48] qui s'est attachée à évaluer l'impact du bruit du chalutage de fond à l'aide d'enregistreurs acoustiques à mouillage fixe. Des niveaux de source (SEL 169-198 dB re 1 µPa) estimés supérieurs aux seuils de dommages pour la faune marine (notamment les cétacés) et supérieurs à ceux émis par les navires en surface ont été mesurés lors d'opérations de chalutage de fond.

Quels sont les impacts potentiels du bruit sur l'ichtyofaune et les populations associées ?

La connaissance de la sensibilité acoustique de l'espèce est primordiale pour évaluer les impacts possibles d'une exposition au bruit chez les poissons. On distingue pour cela les espèces sans vessie natatoire, les espèces munies d'une vessie natatoire mais n'intervenant pas dans la perception auditive, et les espèces munies d'une vessie natatoire intervenant dans la perception auditive. Enfin, les stades de vie entrent en jeu dans la sensibilité des individus (phase embryonnaire, larvaire, juvénile, adulte) [15,49]. Un certain nombre d'études ont analysé les effets de l'exposition au bruit sur les poissons essentiellement en laboratoire et à l'échelle des individus ou des groupes d'individus. Ces études ont utilisé une gamme de méthodes variées et ont ciblé plusieurs espèces différentes. Les comportements et les réponses des poissons par rapport aux sons diffèrent selon les espèces (seuil auditif, présence / absence / taille / morphologie de la vessie natatoire, système otolithique) et même selon l'histoire de vie du poisson selon qu'il soit issu de l'aquaculture ou sauvage. Par conséquent, les résultats indiquent une variété d'impacts allant de blessures graves à une absence d'incidence, ce qui rend les résultats difficiles à extrapoler entre les taxons [50–54]. **La littérature mentionne des impacts physiologiques liés au bruit sur les poissons** à partir d'un niveau de pression de 160-180 dB re 1 µPa. Ces impacts peuvent être caractérisés par des dommages à l'oreille interne, la ligne latérale, la vessie natatoire et les yeux. La sécrétion d'hormones de stress (cortisol) et une augmentation de la fréquence cardiaque ont également été documentées [23,45,52,55–58]. **Certaines études montrent des impacts du bruit sur le comportement** comme par exemple des migrations verticales vers le fond de la colonne d'eau et des réactions de fuites (non-systématiques) [52,59] à partir d'un niveau de pression de 147 dB re 1 µPa. **Les céphalopodes sont** considérés comme acoustiquement sensibles, montrant souvent des comportements d'évasion clairs lorsqu'ils sont exposés à des sons impulsifs intenses de basse fréquence (<1 kHz) [in 53]. Il existe un manque de connaissance des impacts du bruit sur les invertébrés [29,53,60].

Parc éolien en mer du Calvados :

Il existe quelques lacunes dans notre connaissance des effets du bruit sur les poissons qui nécessitent d'être comblées dans le futur pour bien comprendre les implications de l'exposition aux sons anthropiques [23,60]. L'un des effets sublétaux du bruit sous-marin les plus répandus mais mal compris, est le masquage auditif. Des recherches sont nécessaires pour quantifier les effets des activités en mer sur les principaux poissons et invertébrés commerciaux, classés généralement par niveau de priorité. Des efforts supplémentaires dans les domaines de recherche suivant sont nécessaires [53] :

- ✓ Les impacts du bruit sur les invertébrés (des programmes de surveillance acoustique passive du benthos sont en cours BENTHOSCOPE, 1 &2)
- ✓ Les impacts du bruit sur les poissons au regard de la saisonnalité, des cycles de vie et des comportements (par exemples les impacts sur les larves, sur le recrutement).
- ✓ Les impacts à l'échelle des populations et les sphères d'influence (échelles de perturbation).
- ✓ Les impacts des études de sites et du démantèlement des structures marines.
- ✓ Les impacts sur les communautés qui se développent pendant l'exploitation des industries offshore.

En résumé :

Le monde sous-marin n'est pas silencieux et caractérisé par un bruit de fond sonore naturel. Les usages et activités anthropiques (navigation, travaux maritimes, industries offshores, activités de pêche…) sont autant de sources supplémentaires de bruit susceptibles d'impacter les organismes marins. Un certain nombre d'études, essentiellement menées en laboratoire, ont déterminé les impacts potentiels du bruit sous-marin anthropique sur les ressources halieutiques à l'échelle des individus ou des groupes d'individus. En fonction des caractéristiques de la source sonore et des espèces concernées, les résultats indiquent une variété de réponses, allant d'une absence d'incidence à l'observation d'incidences significatives (mortalité, lésions externes et internes, perte auditive temporaire ou permanente, stress physiologique et perturbation du comportement naturel et de la distribution [45,153]). Les différences dans les capacités auditives, la vulnérabilité des différentes espèces de poisson, le tailles et le stades de vie complexifient cette recherche en bioacoustique 40. La communauté scientifique s'accorde sur le fait qu'il existe des lacunes dans notre connaissance et compréhension des effets du son sur les poissons qui nécessitent d'être comblées afin de bien comprendre les implications de l'exposition de la faune marine aux sons anthropiques [23,53,60].

Parc éolien en mer du Calvados :

3.1.2. L'EFFET ACOUSTIQUE DANS LE CONTEXTE DES PARCS EOLIENS OFFSHORES

Le bruit généré par les Parcs Eoliens offshores :

Le bruit sous-marin est fréquemment identifié comme l'une des plus importantes sources d'impacts potentiels des parcs éoliens offshore sur la vie marine, en particulier pendant la phase de construction, que ce soit pour préparer le substrat ou installer les machines .[1,10,46] (Figure 4).

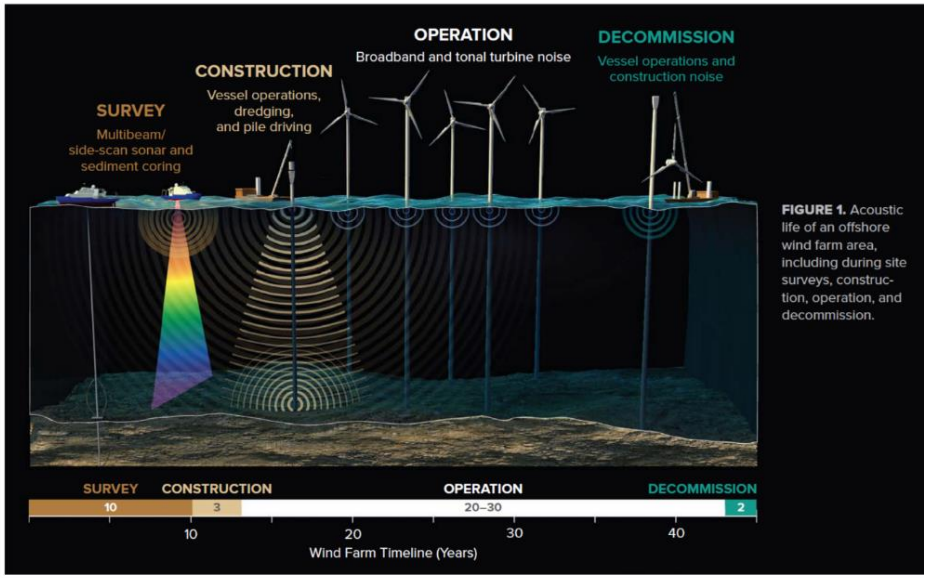


Figure 4 : Emprunte acoustique d'un parc éolien au cours des études préalables, de la construction, du fonctionnement et du démantèlement [53]

En phase de construction, l'installation des fondations est l'opération la plus bruyante et le niveau/type de bruit est variable suivant la technique utilisée :

- **L'utilisation du battage des pieux** génère un bruit impulsif à basse et moyenne fréquence avec un niveau de pression acoustique élevé [61]. Des mesures de niveaux sonores ont été réalisées sur plusieurs parcs lors de leur construction comme sur les sites de North Hoyle au Royaume-Unis [19], C-Power en Belgique [62], Beatrice Wind Farm en Ecosse [63] et Utgrunden en Suède (Maxon et Nielsen, 2000). Les niveaux sonores (à la fois la pression acoustique et le mouvement des particules) varient considérablement en fonction de nombreux facteurs tels que le diamètre du pieu, la taille du marteau, la profondeur de l'eau, les caractéristiques du substrat ou la méthode de mesure [53,64]. Les sons produits par les battages de pieux sont souvent très intenses avec des SELss dépassant souvent les 180 à 200 dB re 1 µPa² s–1 [23].
- L**e vibro-fonçage** est une alternative au battage et est couramment utilisé dans le génie civil. Cette technique qui permet l'enfoncement des pieux. La technique consiste à mettre en vibration le pieu de manière continue par la transmission d'impulsion brèves et à hautes fréquences). Le vibro-fonçage est en général moins bruyant que le battage par impact, avec des niveaux de bruit inférieur de 15 à 20 dB en moyenne. Les émissions sont continues (vibrations) et impulsionnelles (oscillations du vibrateur) et ne sont pas directement comparable avec le bruit impulsionnel du battage de pieux [17,46,65].
- **Le forage** (fonds rocheux ou hétérogènes) peut être utilisé comme alternative au battage et génère un bruit continu plus faible [46].

Parc éolien en mer du Calvados : l'effet acoustique généré par le projet

Les effets sonores aquatiques du projet de parc éolien en mer du Calvados ont fait l'objet d'une étude spécifique conduite par Quiet-Oceans et Bioconsult en 2013 qui concluait que l'ensemble des travaux induirait une augmentation du niveau sonore ambiant. Suite à l'évolution de la méthode d'installation des fondations initialement envisagée (afin d'aboutir à une méthode mieux adaptée aux caractéristiques géotechniques du site), une étude complémentaire a été réalisée par Quiet-Oceans en 2020[17]. Les études acoustiques considèrent que l'empreinte sonore du projet correspond à la zone géographique pour laquelle le bruit généré par une opération spécifique du projet est au-dessus du niveau de bruit actuel.

En phase de construction : Une installation des fondations par battage de pieux avait été envisagée initialement pour le parc éolien de Courseulles-sur-Mer. Par la suite, une **solution mixte de préparation par forage puis d'installation par vibro-fonçage a finalement été retenue**. Les résultats de modélisation concluent à une **réduction des empreintes sonores des travaux d'un rapport 7** pour le forage et **d'un rapport 3 pour le vibro-fonçage** par rapport au scénario de l'étude d'impact initiale, au prix d'un allongement de la durée des travaux (24 heures de forage par pile au lieu de 5 heures de battage)[17].

Scénario	Niveau émis	Niveau d'exposition sonore large bande prédit à 750 m (dB ref 1µPa²s)		
		Min	Moyenne	Max
Battage de pieu (Rejeu)	228 dB ref 1µPa²s@1m	175.0	175.0	175.0
Forage (nouvelle solution)	190 dB ref 1µPa@1m	143.0	143.0	144.0
Vibro-fonçage (nouvelle solution)	198 dB ref 1µPa@1m	153.0	153.9	154.0

Figure 5: Niveau d'exposition sonore large bande attendus à 750m [17]

A titre comparatif, une estimation à partir du modèle de RANDI (travaux de Ross, Wagstaff et Breeding) indique qu'un navire d'une longueur de 300 m circulant à une vitesse de 15 nœuds engendre le même bruit que le vibro-fonçage soit 198 dB ref 1µPa@1m et qu'un navire d'une longueur de 145 m circulant à une vitesse de 15 nœuds engendre le même bruit que le forage soit 190 dB ref 1µPa@1m. La distinction majeure provient du caractère statique de la source de bruit des travaux sur une période continue significative (Comm. Quiet-Oceans).

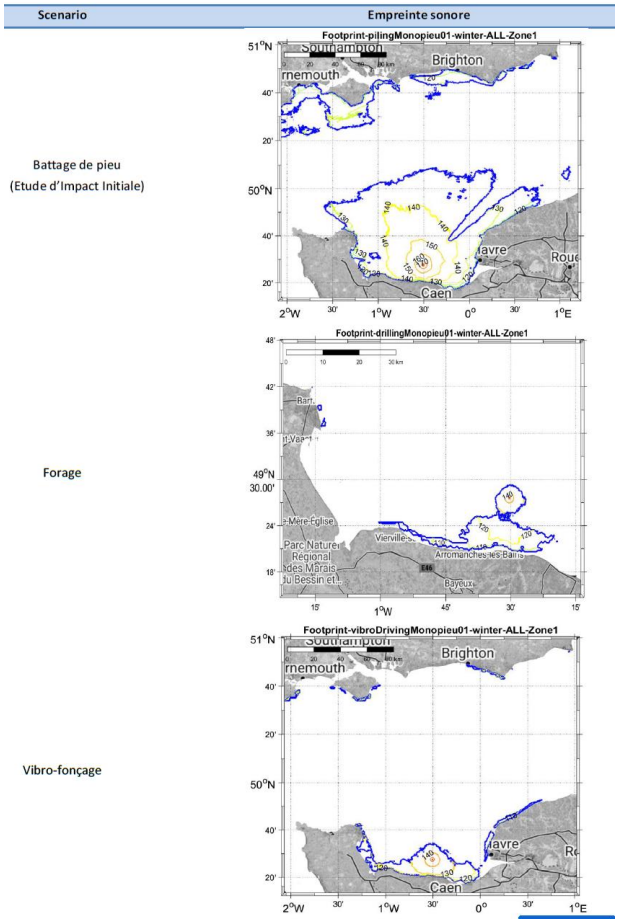


Figure 6: Empreinte sonore de chaque scenario[17]

En phase d'exploitation, le bruit sous-marin généré par une éolienne est essentiellement lié à la turbine. Les nombreuses mesures de bruit réalisées sur les différents parcs éoliens opérationnels, montrent que les niveaux de pression acoustique (exprimés en niveau de bruit continu L_{eq}) sont au moins 10 à 20 dB inférieurs au bruit des navires dans la même gamme de fréquences [47] (entre 81 et 137 dB re 1 µPa)[in 47].

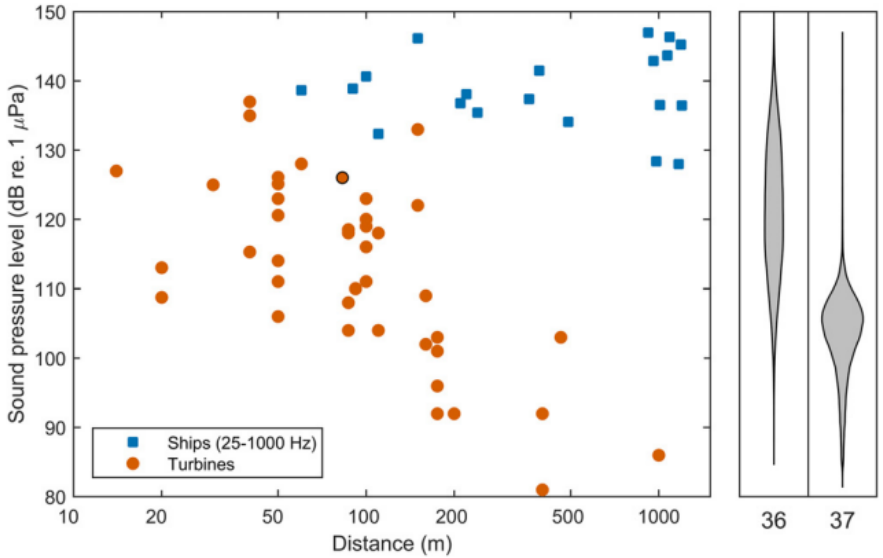


Figure 7: Niveaux de pression acoustique mesurés à différentes distances de turbines en fonctionnement et de navires [47]

Ces mesures montrent également des fréquences comprises entre 14 et 312 Hz. Des mesures faites sur le parc éolien offshore de Belwind, indiquaient une élévation des niveaux de pression acoustique par rapport au bruit de fond sous-marin d'environ ~20 dB re 1 µPa [21]. Les retours d'expériences sur les parcs éoliens du nord de l'Europe (au Danemark, en Suède, Belgique, Allemagne et Écosse notamment) démontrent que le bruit généré par une éolienne en opération dépend de plusieurs paramètres comme le type de fondation, la vitesse du vent, la puissance unitaire des turbines [in 46].

Parc éolien en mer du Calvados : l'effet acoustique généré par le projet

En phase d'exploitation : Les niveaux d'exposition sonore médiane (minimal, médian et maximal) modélisés à 750 mètres des phases considérés ici ont été calculés et reportés dans le tableau suivant :

Phase	Exposition Sonore Minimale	Exposition Sonore Médiane	Exposition Sonore Maximale
Parc en exploitation	121,3	124,2	128,7
Parc en maintenance	132,9	133,4	134,0

Figure 8: Niveaux d'exposition sonore médiane (dB re 1µPa²s) calculés pour une distance de 750 mètres du point considéré [16].

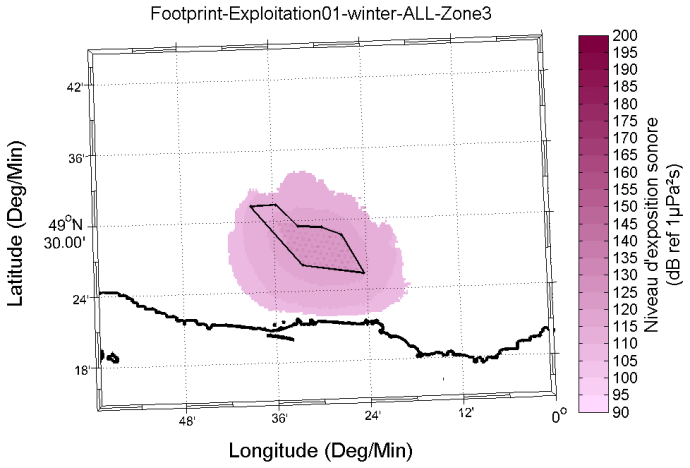


Figure 9: Empreinte sonore du parc en exploitation[16]

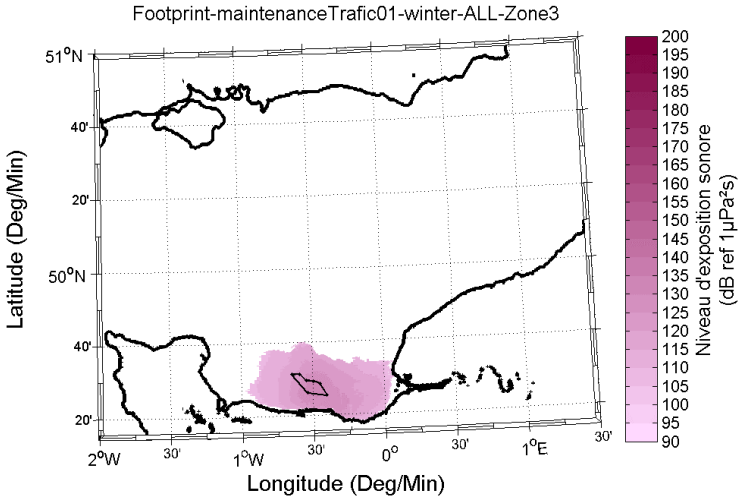


Figure 10: Empreinte sonore du parc soumis à de la maintenance[16]

L'étude d'impact du projet de parc éolien du Calvados indique que le spectre du bruit sous-marin d'une éolienne en fonctionnement est principalement représenté par des basses fréquences de l'ordre de la centaine d'Hertz. Compte tenu de la bathymétrie, la propagation des sons à ces fréquences est relativement limitée en distance. Les niveaux de pression acoustique attendus sont comparables ou inférieurs à ceux générés par d'autres activités anthropiques marines (navigation, pêche, dragage cf Figure 3).

En phase de maintenance, les émissions sonores sont un peu plus élevées, mais ponctuelles, du même ordre que celles générées par les activités de pêche actuellement présentes quotidiennement sur le site. **Les effets sur l'environnement sonore sous-marin en phase d'exploitation sont caractérisés dans cette étude comme négatifs, directs, permanents et faibles.**

Quels sont les impacts anticipés dans le contexte des parcs éoliens en mer ?

Le bruit lié à la construction des parcs éoliens est généralement de basse fréquence, c'est-à-dire de l'ordre de plusieurs dizaines de Hz à 3000 Hz. La gamme auditive de la plupart des poissons est comprise dans cet intervalle [10]. Les sonars acoustiques utilisés lors des relevés préalables émettent des sons de plus hautes fréquences (souvent égales ou supérieures à 100 kHz). A titre comparatif, les fréquences des sonars/sondeurs classiques équipant la plupart des navires se situent entre 20 kHz et 240 kHz (source Furuno). Les espèces les plus sensibles pourraient subir des effets de perturbation dus au bruit jusqu'à plusieurs kilomètres de la source sonores, contre quelques centaines voire dizaines de mètres pour des espèces moins sensibles [49,66]. En fonction de la sensibilité des espèces recensées dans les états initiaux, des caractéristiques des travaux, les impacts anticipés sur la ressource halieutique à l'échelle des parcs éoliens ont été jugés négligeables à forts (avant mesures de réduction) suivant les projets, temporaires avec une influence locale. Wilhelmsson [67] estimait en 2010 que l'on pouvait s'attendre à des effets faibles sur la ressource halieutique (notamment en raison d'un comportement de fuite/évitement attendu), Bergström [9] en 2014, anticipait des impacts moyens a fort (figure 6). Afin de réduire l'impact sonore de la construction, des mesures peuvent être mises en œuvre (procédure de soft-start, rideaux de bulles, boîtiers d'isolement , Hydro Sound Dampers HSD..)[68,69].

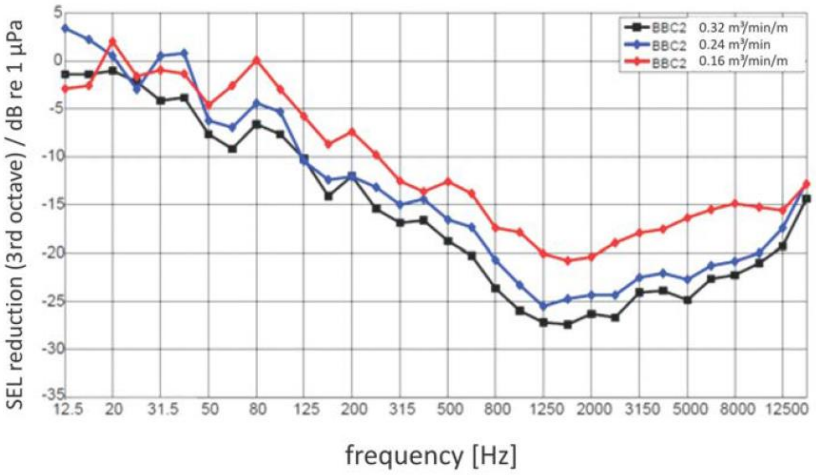


Figure 11: Rideau de bulles (photo: Trianel GmbH/Lang) et mesure de l'efficacité de réduction du bruit lors de la construction du parc de Borkum West II [69]

La phase d'exploitation des parcs éoliens offshores induit également une augmentation des niveaux de pression acoustique et ce pendant toute la durée de vie du parc [21]. Les éoliennes génèrent un bruit à large bande avec quelques tonalités dominantes, détectables par des poissons sensibles à la pression acoustique à une distance de plusieurs kilomètres, même si une intense navigation s'opère dans la région [70]. Il est suggéré qu'une augmentation du bruit de fond peut interférer avec le comportement de recherche de nourriture, la communication (effet de masquage) et induire un stress chez les poissons [22,in 40,71–73]. Toutefois, en raison des niveaux de pression acoustique faibles, les impacts sur la ressource halieutique en phase d'exploitation ont été estimés permanents et d'intensité négligeable à moyenne avec une influence locale (figure 6).

Parc éolien en mer du Calvados : impacts anticipés du bruit sur la ressource halieutique

Effet du bruit				
Phase		Construction		Exploitation
Source		battage de pieux/forage		turbines
Niveau de certitude des prédictions/estimations (1 faible à 5 élevé) (Dan Wilhelmsson et al. 2010		3		4
Échelle estimée de l'impact n.d. = Non évalué	spatiale	locale		locale
	temporelle	temporaire		permanente
	type d'impact (English,2017)	physiologiques, mortalité, évitement		évitement
		Impact avant mesures de réduction	impact résiduel avec mesures de réduction	
Degré estimé d'incidence (-) ou de bénéfice (+) des impacts pour les assemblages d'espèces dans la zone du parc éolien	Dan Wilhelmsson et al. 2010	(-) faible	absence de mesure spécifique ou non-évalué	(-) faible
	Bergström et al. 2014	(-) moyen à fort	absence de mesure spécifique ou non-évalué	(-) moyen
	North Sea Power WindPark (Belgique)	(-) fort	absence de mesure spécifique ou non-évalué	(-) négligeable
	Morray West Wind Farm EIA (Eco)	(-) faible	absence de mesure spécifique ou Non-évalué	(-) négligeable à faible
	Rampion Wind Farm EIA (En)	(-) négligeable à moyen (suivant les espèces)	(-) négligeable à moyen (suivant les espèces)	non évalué
	Hornsea 3 Wind Farm EIA (En)	(-) faible	absence de mesure spécifique ou Non-évalué	(-) négligeable
	Hornrev 2 Wind Farm EIA (Dan)	(-) faible (fondations gravitaires) à moyen (monopieux)	absence de mesure spécifique ou Non-évalué	(-) faible
	Gunfleet Sands 2 Wind Farm EIA (En)	(-) moyen à fort	absence de mesure spécifique ou Non-évalué	non évalué
	Greater gabbard Wind Farm EIA (E (En)	(-) négligeable à (-) Faible	(-) négligeable à (-) Faible	(-) négligeable à faible
	Sheringham Shoal Wind Farm EIA (En)	(-) négligeable à faible	absence de mesure spécifique ou Non-évalué	(-) négligeable
	Parc éolien de St-Nazaire EI (Fr)	(-) négligeable à (-) faible	non significatif	(-) négligeable
	Parc éolien de Dieppe - le Tréport EI (Fr)	(-) négligeable à moyen	(-) Négligeable à faible (impacts physiologiques des espèces mobiles. Faible à moyen (frayère et fonctionalités écologiques	(-) négligeable à faible
	Parc éolien de Yeu-Noirmoutier EI (fr)	(-) moyen	(-) faible	(-) faible
	Parc éolien de Fécamp EI (fr)	(-)faible	absence de mesure spécifique ou non-évalué	(-)faible

Figure 12: Estimation des impacts du bruit sur la ressource halieutique dans plusieurs parcs éoliens offshores [9,67,82,83,74–81]

En résumé :

En phase de construction, les projets de Parcs éoliens en mer produisent une augmentation du bruit sous-marin ou « effet acoustique » principalement en raison des opérations d'installation des fondations. L'intensité des bruits générés varie suivant les techniques utilisées. Les opérations de battage de pieux génèrent un bruit impulsif à basse et moyenne fréquence avec des niveaux d'exposition élevés. Les techniques de vibro-fonçage et de forage (prévues pour l'installation du parc éolien de Courseulles-sur-Mer) induisent un bruit continu de plus faible intensité sur une durée plus longue. Les espèces les plus sensibles pourraient subir des effets de perturbation dus au bruit jusqu'à plusieurs kilomètres de la source sonores, contre quelques centaines voire dizaines de mètres pour des espèces moins sensibles. Les impacts anticipés pour la ressource halieutique à l'échelle des parcs éoliens ont été estimés temporaires, entre négligeable et fort suivant les projets et d'influence locale. Afin de réduire l'impact sonore de la construction, des mesures sont généralement mises en œuvre (procédure de soft-start, rideaux de bulles, boîtiers d'isolement, Hydro Sound Dampers HSD..).

En phase d'exploitation, le bruit sous-marin produit par les éoliennes est bien plus faible (comparable ou inférieur au bruit généré par d'autres activités anthropiques marines) et continu. Les impacts induits sont généralement estimés permanents, entre négligeable et moyen et d'influence locale.

Parc éolien en mer du Calvados : impacts anticipés du bruit sur la ressource halieutique

L'étude d'impact environnementale réalisée dans le cadre du projet de parc éolien en mer de Courseulles-sur-Mer prévoit des impacts du bruit sur les populations halieutiques (négatifs, directs et temporaires) négligeables (invertébrés) à moyens (poissons et larves) **en phase de construction pendant les phases d'installation des fondations**. Ces impacts avaient été anticipés en considérant :

- ✓ Une solution d'implantation des fondations impliquant une technique de battage de pieux (avec des niveaux sonores maximaux à la source de 228 dBp re 1µPa).
- ✓ La possibilité de lésions physiques et/ou de conséquences physiologiques sur les poissons pélagiques et bentho-démersaux.
- ✓ Une faible sensibilité au bruit des espèces d'invertébrés

La solution finalement retenue (vibro-fonçage, forage) génère des bruits moins intenses (190/198 dBp re 1µPa à la source), continus sur une durée plus importante. Les impacts de cette nouvelle solution seront potentiellement plus faibles que ceux estimés initialement.

Les impacts **en phase d'exploitation** ont été jugés nuls/négligeables (espèces amphihalines, larves) à faibles pour les autres composantes [16].

Bruit					
Phase	Compartiment	Evaluation des impacts			
		Positif/négatif	Direct/indirect	Durée	Impact résiduel
construction	Espèces de poissons pélagiques	négatif	direct	temporaire	moyen
	Espèces de poissons benthiques	négatif	direct	temporaire	moyen
	Espèces amphihalines	négatif	direct	temporaire	faible
	Larves	négatif	direct	temporaire	moyen
	invertébrés	négatif	direct	temporaire	négligeable
exploitation	Espèces de poissons pélagiques	négatif	direct	permanents	faible
	Espèces de poissons benthiques	négatif	direct	permanents	faible
	Espèces amphihalines	négatif	direct	permanents	nul à négligeable
	Larves	négatif	direct	permanents	nul
	invertébrés	négatif	direct	permanents	faible

Figure 13 : Evaluation initiale des impacts du bruit sur la ressource halieutique dans le cadre du projet éolien offshore de Courseulles-sur-Mer

3.1.3. QU'OBSERVE-T-ON SUR LES PARCS EOLIENS EN FONCTIONNEMENT ?

De manière générale, des structures de peuplements (hors effet récif) équivalentes ou supérieures aux secteurs environnants (en termes de diversité et d'abondances) ont été observées au cours des suivis halieutiques à long termes conduit sur les différents parcs éoliens offshore en exploitation (cf 3.3. et 3.4). Cela confirme que la plupart des impacts décrits ci-dessous sont temporaires (pendant la construction).

En Allemagne, le suivi halieutique des espèces pélagiques du parc éolien Alpha Ventus (de 2008 à 2012) couvrait les périodes de pré-construction, de construction et de post construction. Différentes saisons (printemps, été et automne) et localisations (périmètre du parc et zones de références à l'extérieur), ont été prospectées (suivi hydroacoustiques, pêches scientifiques avec analyses de contenus stomachaux). Une diminution significative (-50% en été et -40% en automne) des abondances de poissons pélagiques a été mesurée au sein du périmètre du parc (par rapport aux zones de références) lors de la période de construction en 2009 [37]. Les intensités sonores élevées qui se sont produites pendant le battage de pieux ont été considérées comme la principale cause de ce déclin temporaire [in 10]. La situation s'est ensuite rétablie puisque qu'en 2010, aucune différence significative entre les abondances au sein du parc et celles mesurées dans le zones de référence n'était constatée post-construction [37].

En Belgique, , après 9 ans de suivi, les résultats des suivis indiquent une absence d'impact à long terme sur les assemblages de poissons des sédiments meubles entre les turbines (à des distances> 200 m)[13]. Quelques impacts de la construction à court terme ont été observés par les suivis halieutiques après le début des activités de battage, comme par exemple l'augmentation de la densité du lançon *Ammodytes tobianus* et des densités réduites de limandes, ophiuroïdes *Ophiura ophiura*, de calmars *Allotheutis subulata* et de dragonnets Lyre *Callionymus lyra* [41]. Parallèlement, afin d'étudier plus spécifiquement (à l'échelle des individus) les impacts possibles du bruit, une expérience a été menée in-situ pendant la construction du parc de Nobelwind. L'auteure précise que les poissons n'avaient pas la possibilité de fuir la source sonore comme pourraient le faire les spécimens sauvages [84]. De grandes cages contenant entre 9 et 12 cabillauds ont été immergés à 8 m de profondeur et placées à des distances croissantes (75 m, 400 m, 1400 m et 1700 m) de la source sonore (battage de pieux). La même expérience a été réalisée en l'absence d'activité de battage de pieux. Cette étude a mis en évidence une forte augmentation des barotraumatismes des cabillauds situés les plus proches des zones de battage de pieux. La plupart des individus placés dans des cages près de la source sonore ont survécu à l'expérience. Cependant, des lésions internes et des comportements de nage anormaux ont été détectés. Aucune rupture de vessie natatoire n'a été constatée à 1700 m ni dans les zones témoins. 20 % des individus présentaient des ruptures à 1400 m de distance, 40% à 400 m distance et jusqu'à 90 % à 75 mètres. Une expérience similaire sur les juvéniles de bars communs (*Dicentrarchus labrax*) a été conduite sur le parc de NorthWind pendant sa construction. Après exposition au battage de pieux, une réduction temporaire du métabolisme (consommation d'O^2 et concentration en lactate) a été mesurée. Des changements comportementaux temporaires (activité de nage, agressivité envers les congénères) ont été documentés au début de l'exposition sonore impulsive ainsi qu'une diminution temporaire de prise de nourriture (efficacité alimentaire).

En Suède, une étude des impacts du bruit généré pendant le fonctionnement des turbines sur les poissons migrateurs (suivi télémétrique par Westerberg, 1999) n'a pas montré d'incidence significative du parc Svante sur les directions des migrations des anguilles. Westerberg rapporte qu'il n'y avait aucune différence entre les deux groupes d'anguilles suivis en ce qui concerne la vitesse de migration ou la distance vis-à-vis des turbines (entre 500-2000 m). L'auteur indique qu'aucun changement de comportement n'a été démontré [in 54].

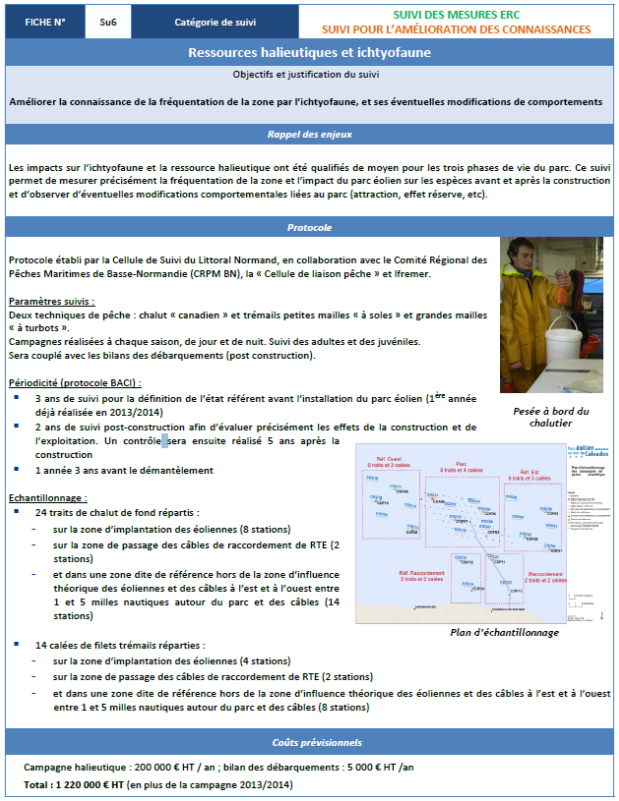
Parc éolien en mer du Calvados : impacts anticipés du bruit sur la ressource halieutique

Concernant l'effet acoustique, des impacts similaires à ceux observés sur les autres parcs éoliens en fonctionnement pourront intervenir sur le parc éolien offshore du Calvados.

Une diminution de la fréquentation de la zone des travaux par les espèces pélagiques et bentho-démersales est attendue. Exprimé à l'échelle locale, cet impact sera temporaire et un retour rapide à la situation pré-travaux est également attendue compte tenu de la résilience des espèces. L'ampleur de ces impacts sera possiblement moins marquée que sur les parcs ayant opté pour une technique de battage de pieu (l'essentiel des parcs éoliens actuellement en fonctionnement) dans la mesure où, pour le projet de Courseulles-sur-Mer, une solution moins pénalisante en termes de bruit est privilégiée (utilisation d'une méthode mixte de vibrofonçage et de forage). **L'étude d'impact environnementale réalisée dans le cadre du projet de parc éolien en mer de Courseulles-sur-Mer prévoit plusieurs mesures de réduction des effets acoustiques**. Ces mesures sont principalement à destination des mammifères marins (dispositifs de dissuasion acoustique et d'effarouchements). Le démarrage progressif des travaux (procédure soft-start) pourra cependant concerner également la ressource halieutique favorisant notamment la fuite des espèces très mobiles et l'évitement des secteurs perturbés par les travaux.

Plusieurs programmes de surveillance du bruit ou de la ressource halieutique seront menés en parallèle et permettront de détecter et quantifier les impacts du projet incluant ceux imputables à l'augmentation du bruit :

- ✓ **Mesure « SU6 : Améliorer la connaissance de la fréquentation de la zone par l'ichtyofaune, et ses éventuelles modifications de comportements »** : ce suivi prévoit de mesurer précisément la fréquentation de la zone et l'impact du parc éolien sur les espèces avant et après la construction. A l'instar des suivis menés sur les parcs Européens, cette mesure permettra de surveiller les évolutions de la structure des peuplements bentho-démersaux liées au parc (incluant les impacts du bruit généré lors de la construction).



FICHE N°	Su6	Catégorie de suivi	SUIVI DES MESURES ERC SUIVI POUR L'AMÉLIORATION DES CONNAISSANCES

Ressources halieutiques et ichtyofaune

Objectifs et justification du suivi

Améliorer la connaissance de la fréquentation de la zone par l'ichtyofaune, et ses éventuelles modifications de comportements

Rappel des enjeux

Les impacts sur l'ichtyofaune et la ressource halieutique ont été qualifiés de moyen pour les trois phases de vie du parc. Ce suivi permet de mesurer précisément la fréquentation de la zone et l'impact du parc éolien sur les espèces avant et après la construction et d'observer d'éventuelles modifications comportementales liées au parc (attraction, effet réserve, etc).

Protocole

Protocole établi par la Cellule de Suivi du Littoral Normand, en collaboration avec le Comité Régional des Pêches Maritimes de Basse-Normandie (CRPM BN), la « Cellule de liaison pêche » et Ifremer.

Paramètres suivis :
Deux techniques de pêche : chalut « canadien » et trémails petites mailles « à soles » et grandes mailles « à turbots ».
Campagnes réalisées à chaque saison, de jour et de nuit. Suivi des adultes et des juvéniles.
Sera couplé avec les bilans des débarquements (post construction).

Périodicité (protocole BACI) :
- 3 ans de suivi pour la définition de l'état référent avant l'installation du parc éolien (1ère année déjà réalisée en 2013/2014)
- 2 ans de suivi post-construction afin d'évaluer précisément les effets de la construction et de l'exploitation. Un contrôle sera ensuite réalisé 5 ans après la construction
- 1 année 3 ans avant le démantèlement

Pesée à bord du chalutier

Echantillonnage :
- 24 traits de chalut de fond répartis :
  - sur la zone d'implantation des éoliennes (8 stations)
  - sur la zone de passage des câbles de raccordement de RTE (2 stations)
  - et dans une zone dite de référence hors de la zone d'influence théorique des éoliennes et des câbles à l'est et à l'ouest entre 1 et 5 milles nautiques autour du parc et des câbles (14 stations)
- 14 calées de filets trémails réparties :
  - sur la zone d'implantation des éoliennes (4 stations)
  - sur la zone de passage des câbles de raccordement de RTE (2 stations)
  - et dans une zone dite de référence hors de la zone d'influence théorique des éoliennes et des câbles à l'est et à l'ouest entre 1 et 5 milles nautiques autour du parc et des câbles (8 stations)

Plan d'échantillonnage

Coûts prévisionnels

Campagne halieutique : 200 000 € HT / an ; bilan des débarquements : 5 000 € HT /an
Total : 1 220 000 € HT (en plus de la campagne 2013/2014)

Figure 14: Mesure de suivi de la ressource halieutique et de l'ichtyofaune-Projet du parc éolien en mer du Calvados (Fiche n°SU6).

Sur le parc de Lillgrund, la corrélation entre les niveaux de bruit (mesurés pendant le fonctionnement des turbines et modélisés) et les captures de poissons ont été étudiées sur plusieurs années. L'analyse a indiqué de faibles effets de l'environnement acoustique local sur les schémas de distribution des poissons autour des fondations. Certaines espèces de poissons (blennies vivipares *et* anguille européenne) montraient une présence plus faible à proximité des fondations lorsque les niveaux de bruit étaient plus élevés (en cas de vent fort et de fonctionnement maximal des turbines par exemple). Parallèlement, aucune incidence de l'élévation du bruit à proximité des fondation n'était détecté pour d'autres espèces (cabillaud et chabot buffle par exemple) [in 53,85].

Au Danemark, les chercheurs [38] ont suggéré que l'augmentation de l'abondance de lançons sur le parc de Horns Rev en 2004 pourrait être liée à des changements dans l'abondance des prédateurs (par exemple, le cabillaud et la sole) temporairement plus faible, en raison du battage de pieux, pendant la phase de construction [in 10].

Aux USA, lors de la construction du parc éolien de Block Island, une étude sur les poissons plats a montré une diminution des abondances de plies rouges pendant la période de battage de pieux et des abondances plus élevées pendant la période de pose du câble (dans les zones de référence et dans la zone du parc). Ces variations se sont produites dans les trois zones suivies (deux zones de références, et zone du parc) ce qui pourrait refléter soit une fluctuation de population à l'échelle régionale soit un effet acoustique perçu jusque dans les zones de références situées entre 2 et 3 km de la zone su parc pour cette espèce. Parallèlement, les abondances de autres espèces poissons plats n'ont pas été diminuées pendant cette même période (battage de pieux et pose du câble) [86].

Au Royaume-Uni, Mueller-Blenkle et al. (2010) ont observé que le cabillaud et la sole réagissaient à des niveaux de pression acoustique relativement faibles provenant du battage de pieux. En réponse au stimulus, les deux espèces adoptaient un comportement de fuite de la source en augmentant leur vitesse de nage. Le cabillaud a montré une réponse significative (immobilisation) au début et à la fin de l'exposition sonore. Les auteurs ont également rapporté une forte variabilité des réactions comportementales entre les individus et une diminution de la réponse au fil des expositions multiples, suggérant un certain degré d'accoutumance [in 10,73].

Une étude a été conduite sur le parc de Scroby Sand afin d'évaluer les impacts du projet sur la sterne naine (le secteur est proche d'une importante colonie d'importance internationale) et ses proies comme le hareng (le secteur est situé a à proximité d'une frayère présumée pour cette espèce) ou le sprat. L'étude a été menée sur une période de cinq ans (deux années d'échantillonnage pré-construction en 2002 et 2003, une année pendant la construction (2004) et deux années post-construction en 2005 et 2006). L'abondance des proies a été évaluée au moyen de pêches scientifiques (filet à ichtyoplancton) dans le secteur du parc et plusieurs secteurs environnants (incluant des secteurs côtiers). Espèce majoritaire dans les captures, les juvéniles de hareng ont montré une diminution locale en termes d'abondance à partir de 2004 qui ne pouvait s'expliquer par des facteurs environnementaux (aucune diminution n'était constatée pour les autres espèces). Compte tenu de la sensibilité auditive de cette espèce, les auteurs ont suggéré que les adultes avaient pu être affectés par les activités de battage de pieux (fuite ou mortalité) entrainant une baisse de recrutement les deux années suivantes[87]. L'impact observé à Scroby Sand était temporaire. Toutefois, le risque d'impacts du bruit sur les populations de hareng a conduit le Royaume-Unis à renforcer la connaissance des zones de frayères de cette espèce d'une part et à mettre en place des mesures de réduction et d'évitement (battage de pieux hors périodes de frai) pour certains projets de parcs éoliens Offshore (19 sont actuellement concernés) [88,89].

Parc éolien en mer du Calvados : impacts anticipés du bruit sur la ressource halieutique

- ✓ **Mesure Su2b :** cette mesure prévoie la réalisation d'état de référence du bruit sous-marin et d'une évaluation du bruit engendré par le parc (suivi acoustique par hydrophones à large spectre de gamme de fréquence).
- ✓ **Suivi de la Coquille Saint Jacques** [90]: un programme de suivi pluriannuel pendant les différentes phases du projet sera mis en œuvre (prescrit par l'arrêté préfectoral complémentaire n°2021/13 du 24 décembre 2021) pour évaluer spécifiquement les impacts du projet sur la coquille Saint-Jacques (2022,2023,2024,2025 puis en phase d'exploitation). Ce suivi intègre le déploiement d'un enregistreur acoustique à large bande afin de corréler d'éventuels changements biologiques à l'évolution de l'environnement acoustique. Ce suivi est une extension du projet OASICE (cOquille Saint-JAcques, outil de Surveillance de l'Impact des Câbles Electriques), mené par le CNRS et TBM qui vise à évaluer l'incidence des CEM du câble IFA2 et des câbles de raccordement du parc éolien (maitrise d'ouvrage de RTE).

Le Projet de parc éolien est également un site pilote dans plusieurs programmes internationaux de surveillance de la ressource halieutique dans le cadre des projets d'exploitation d'énergie renouvelable en mer :

- ✓ **FISHINTEL** [91] **:** ce projet collectif regroupe 12 partenaires de 3 pays différents pour l'Installation d'un réseau de mesure par télémétrie acoustique dans la Manche afin de surveiller le déplacement à large échelle des espèces mobiles (bar commun, lieu, thon rouge, langouste). L'objectif est d'étendre le réseau de télémesure acoustique au large, au sein de futures zones d'exploitation d'énergies renouvelables offshore pour répondre aux enjeux liés aux espèces mobiles. Le parc de Courseulles-sur-Mer fait partie des sites pilotes de ce programme :

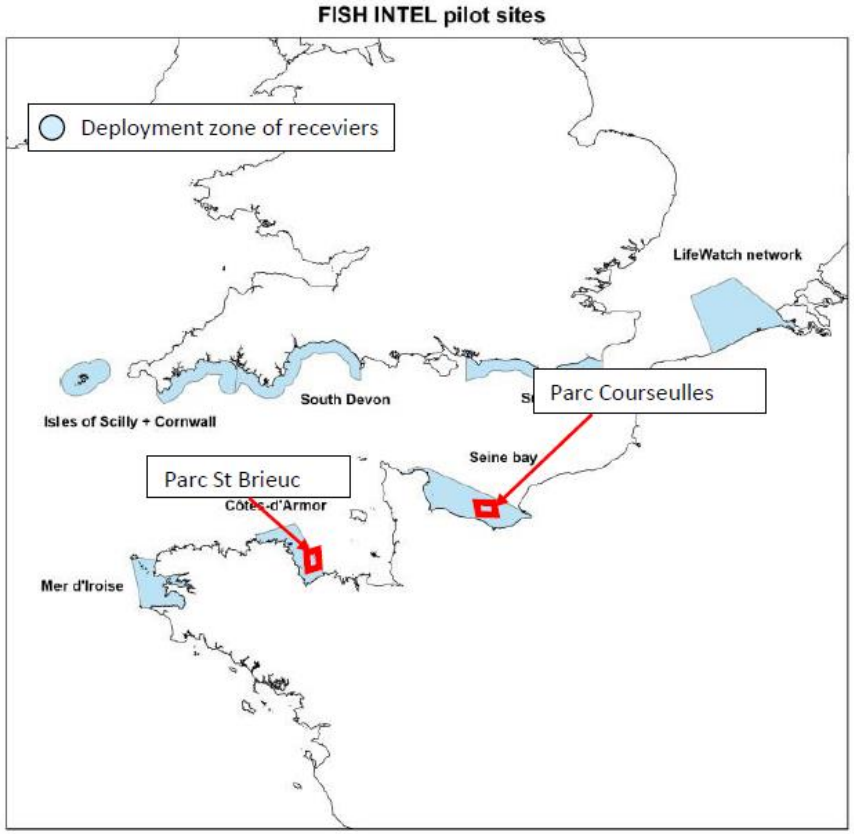


Figure 15: Sites pilotes du programme FISHINTEL

En mer du Nord, une étude récente s'est attachée à comparer la réponse des poissons pélagiques au bruit sur trois parcs éoliens le long des côtes néerlandaise et belge au moyen d'échosondeurs. Sur l'un des parcs (Belwind en Belgique) une étude sismique expérimentale (réseau de canons à air à grande échelle) était en cours. Un autre parc (C-power en Belgique) était concerné par une activité de battage de pieux. Enfin le troisième site (Gemini situé très au large des pays bas) n'était exposé à aucun bruit impulsif (uniquement le bruit de fonctionnement et de la navigation dans les eaux adjacentes). Des échosondeurs ont été placés dans chaque parc éolien et ont enregistré la présence et le comportement des poissons avant, pendant et après les expositions. Au cours de l'exposition au bruit sismique, les bancs de poissons étaient moins nombreux mais plus cohésifs (resserrés) qu'avant l'exposition. Pendant le battage des pieux, les poissons évoluaient en bancs resserrés à des profondeurs moins importantes. Toutefois, les mêmes types de comportements ont également été observés sur le site de contrôle sans exposition impulsive au son et les auteurs suggèrent que des variations de paramètres environnementaux ont pu également intervenir (hydrodynamisme, température de l'eau). Les auteurs rapportent qu'il est nécessaire d'approfondir et de répliquer ce type de suivi avant de pouvoir caractériser précisément les réponses comportementales au bruit des poissons pélagiques dans le contexte des parcs éoliens [92].

En résumé :

Les études et suivis opérés lors des différentes phases des projets de parcs éoliens offshores montrent une variabilité importante des conséquences de l'effet acoustique sur l'ichtyofaune. Des dommages physiques (lésion, modifications du métabolisme) ou comportementaux (fuite, attraction, modification des comportements alimentaires ou de nage) ainsi que des diminutions d'abondances ont pu être mis en évidence en phase de construction en raison des activités de battage de pieux.

Ces impacts ne semblent pas avoir affecté la structure des peuplements halieutiques sur le long terme puisque des structures de peuplements équivalentes ou supérieures aux secteurs environnants (en termes de diversité et d'abondances) ont rapidement été observées (cf 3.3. et 3.4).

Parc éolien en mer du Calvados : impacts anticipés du bruit sur la ressource halieutique

- ✓ **FISHOWF**[91] **:** Ce projet collectif regroupe 14 partenaires avec pour objectif de développer pour une surveillance à long terme des communautés de poissons capables de détecter les effets des parcs éoliens offshores. L'objectif est de surveiller les schémas d'occupation et les mouvements des élasmobranches (raie brunette, raie bouclée, émissole tacheté, aiguillat commun, requin taupe) à l'aide de la télémétrie acoustique. L'objectif est d'identifier les effets des projets de parcs éoliens en mer à l'échelle fine -- (près des ouvrages), moyenne (sur l'emprise des projets) et régionale.

Le parc de Courseulles-sur-Mer fait partie des sites pilotes retenus pour ce programme :

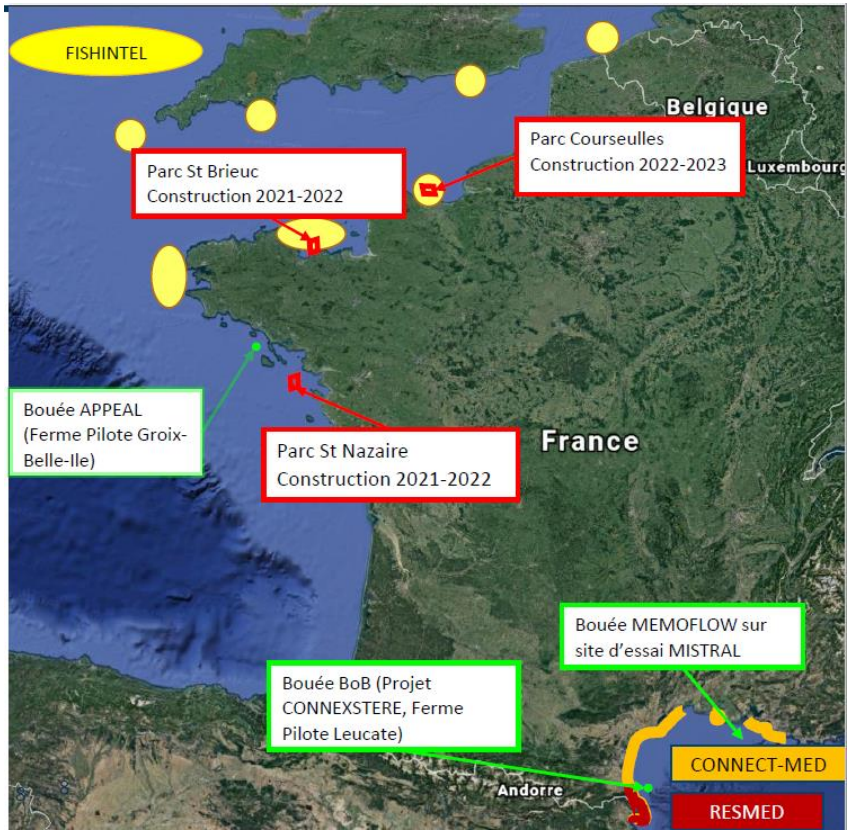


Figure 16: Sites pilotes retenus dans le cadre du programme FISHOWF

3.2. EFFET TURBIDE

3.2.1. GENERALITES

Qu'est-ce que l'effet turbide :

La turbidité est une propriété optique de l'eau, reliée à la concentration en matières en suspension, et dont les variations indiquent l'intensité des flux sédimentaires verticaux et/ou horizontaux, elle est l'inverse de la limpidité. La turbidité est principalement contrôlée par la concentration en matières en suspension (MES : agrégats composés de minéraux et de matière organique) qui proviennent de sources naturelles (processus d'érosion du fond, de dépôt et transport dans la colonne d'eau de sédiments provenant du ruissellement terrestre/fluvial). La concentration, composition, taille et structure des MES varient en fonction de l'intensité des facteurs hydrodynamiques : marée, vagues, courants, turbulence, saison. En Manche, le niveau de turbidité est variable dans le temps (variations quotidiennes, saisonnières) et dans l'espace (zones côtières, zones du large)[93]. Les concentrations naturelles en matières en suspension au niveau de la baie de Seine sont dépendantes du débit de la Seine et de l'agitation occasionnée lors des épisodes de tempête. Les valeurs maximales relevées entre 1978 et 1992 à une dizaine de kilomètres de l'estuaire de la Seine atteignent 20 mg/L. Au large de Courseulles-sur-Mer, la valeur maximale mesurée en 2008 atteignait 5 mg/L [16].

Les activités anthropiques (dragages, travaux maritimes, engins de pêche, rejets en mer) peuvent contribuer à l'augmentation des MES dans la colonne d'eau ([94,95], dynalit.fr) et donc de la turbidité naturelle.

Quels sont les impacts potentiels de l'augmentation de la turbidité sur l'ichtyofaune et les populations associées ?

La variabilité spatio-temporelle naturelle de la turbidité fait qu'il est très difficile de déterminer l'impact de son augmentation temporaire sur les récepteurs.

Certaines études indiquent qu'une turbidité élevée peut nuire aux organismes sensibles, tels que les poissons juvéniles [in 9]. L'effet turbide peut avoir des conséquences négatives et impacter localement la diversité biologique [96].

La diminution de la transparence de l'eau peut limiter la lumière pour les producteurs primaires et avoir un impact sur l'alimentation des poissons (détection des proies) [in 14,97]. L'augmentation de la turbidité peut provoquer un comportement d'évitement chez certaines espèces alors que d'autres prospèrent dans les eaux troubles, vraisemblablement en raison de la prédation [in 29,98]. La remise en suspension du sédiment modifie la turbidité, affectant ainsi les probabilités de rencontres prédateur-proie. Les proies peuvent fuir la zone concernée pour éviter le risque de prédation tandis que les prédateurs peuvent être attirés vers ces secteurs pour se poster en embuscade avec des chances de succès plus importants [99]. Parallèlement, les sédiments en suspension dans la colonne d'eau (turbidité) peuvent réduire la mortalité car la vision du prédateur peut être inhibée [12].

La présence de particules minérales dans la colonne d'eau peut également endommager les branchies des jeunes larves de poisson (e.g une expérience sur le mérou à tache orange détectaient 30% de mortalité à partir d'une concentration de MES de 30 mg/L) ou affecter la survie précoce des recrues de cabillaud dont les œufs sont pélagiques en cas de turbidité prolongée. [in 14,94,100]. Les processus de remise en suspension/dépôt à travers le panache peuvent enterrer les œufs des espèces qui pondent sur le fond [14]. Dans les cas où des zones contaminées ne pourraient pas être évitées, l'impact potentiel sur les poissons dépend des conditions hydrodynamiques du milieu. La remise en suspension de particules toxiques est alors susceptible d'entraîner des conséquences létales sur les œufs et larves de poissons. [15]. Une étude sur les seiche commune suggère qu'une légère turbidité peut améliorer le développement de la vision chez les jeunes seiches sans nuire à leur taux de survie [93].

Une étude en milieu contrôlé sur les coquilles Saint-Jacques (*Pecten maximus*) et les pétoncles blancs (*Aequipecten opercularis*) s'est intéressée aux impacts de l'élévation des matières en suspension et le recouvrement par les sédiments. L'efficacité de la filtration des invertébrés pourrait être temporairement modifiée à partir de fortes augmentations de MES (entre 200 et 700 mg/l) alors que de plus faibles concentrations (entre 50 et 100 mg/l) n'ont montrées aucun impact. Une durée prolongée de recouvrement par les sédiments fins peut affecter la survie des individus. *P. maximus* apparaît plus tolérant qu'*Aequipecten opercularis* à l'enfouissement et à des niveaux élevés de MES [25].

Parc éolien en mer du Calvados :

Cependant, les organismes marins caractéristiques des zones exposées aux fortes conditions hydrodynamiques et aux apports turbides des fleuves sont généralement adaptés aux grandes fluctuations de turbidité. Dans les zones estuariennes (comme la baie de Seine), cette matière organique, composée de biomasse vivante et morte, est indispensable aux organismes hétérotrophes et joue un rôle important dans le cycle de la matière et des éléments. La matière organique vivante sous la forme de biomasse chlorophyllienne (producteurs primaires) fournit la nourriture nécessaire aux consommateurs primaires et soutient ainsi le réseau trophique local. La nécrosasse (biomasse morte en décomposition), joue également un rôle majeur notamment dans le recyclage de la matière organique et donc dans le recyclage des nutriments ou le stockage de carbone[101]. Dans ces milieux, la turbidité peut être un facteur structurant pour les communautés de poissons juvéniles en limitant potentiellement la pression de prédation d'après une étude conduite en baie de Seine [102].

En résumé :

La turbidité est la mesure de la clarté relative de l'eau principalement liée aux concentrations en matières en suspension (particules fines, minérales ou organiques). Dans le milieu marin, la turbidité naturelle évolue quotidiennement de manière plus ou moins forte en fonction de la localisation (eaux du larges ou zone côtière, proximité/taille des estuaires etc.) et des facteurs environnementaux (hydrodynamisme, nature des fonds, activité planctonique etc.). Les activités anthropiques (dragages, travaux maritimes, engins de pêche, rejets en mer) peuvent contribuer à l'augmentation des MES dans la colonne d'eau et donc de la turbidité naturelle. En fonction de l'ampleur et la durée de l'effet turbide, des perturbations comportementales (relations proies-prédateurs, attraction, répulsion) ou physiques (efficacité de la filtration chez les mollusques, l'obstruction des branchies de certains poissons, le recouvrement des œufs, développement plus important de la vision chez les jeunes seiches) sont possibles chez les organismes marins. Cependant, les organismes marins caractéristiques des zones exposées aux fortes conditions hydrodynamiques et aux apports turbides des fleuves sont généralement adaptés aux grandes fluctuations de turbidité. Les apports de matières organiques souvent très élevés soutiennent le réseau trophique local.

3.2.1. L'EFFET TURBIDE DANS LE CONTEXTE DES PARCS EOLIENS OFFSHORES

L'effet turbide généré par les parcs éoliens offshore :

En phase de construction, battage de pieux, forage et installation des câbles provoquent une remise en suspension et une dispersion des particules de sédiments. La concentration et le rayon des effets dépendront de la granulométrie (et notamment de la fraction de particules fines, facilement remobilisables avec de faibles vitesses de chute), de l'hydrodynamisme et du type de fondations déployées. [14,26,67].

Des études morphologiques ont montré que l'augmentation de la turbidité est principalement due à des événements météorologiques plutôt qu'à la construction et l'exploitation des parcs éoliens [41]. Les auteurs constatent également l'absence de différence significative entre les concentrations moyennes de matières en suspensions (MES) (annuelles et mensuelles) en surface avant et après l'installation du parc éolien. Ils indiquent que l'effet turbide de la construction est local et temporaire. Les programmes de surveillance des parcs éoliens britanniques de Barrow et North Hoyle en mer d'Irlande (situés sur des substrats de sables et de graviers) ont mesuré cet effet lors des phases de construction. Les résultats indiquent que l'influence naturelle des marées et des conditions météorologiques avait un plus grand effet sur la concentration des particules de sédiments en suspension que les activités d'installation des fondations. Sur le parc éolien d'Ormonde, également en mer d'Irlande et situé sur substrat plus fin, le battage de pieux a temporairement produit un panache de sédiments qui ne s'étendait pas au-delà de 300 mètres du site [in 28].

Parc éolien en mer du Calvados : l'effet turbide généré par le projet

Les sédiments dans le périmètre du parc de Courseulles-sur-Mer contiennent très peu de particules fines (- de 5% de particules < 63µm au maximum et – de 1% sur la majorité du territoire).

Les impacts des travaux sur la turbidité (remise en suspension des particules fines lors des opérations de forage) ont été estimés négligeables dans l'étude d'impact environnementale (scénario initial).

En phase d'exploitation, l'étude d'impact indique que la présence des fondations n'affectera l'évolution des fonds que très localement autour des fondations et ne perturbera donc pas l'évolution naturelle des fonds au-delà du site d'implantation du parc éolien. À l'intérieur du parc éolien, aucune interaction entre les impacts sédimentaires des différentes fondations est attendue. L'impact de la présence du parc éolien sur la dynamique sédimentaire à l'échelle régionale est négligeable, et à l'échelle du parc est négatif, direct, permanent et faible [16].

Suite à l'évolution de la solution technique (vibro-fonçage, forage), de nouvelles modélisations numériques ont été réalisées. Celles-ci prévoient que les concentrations en MES induites par les travaux de forage pourraient dépasser les valeurs maximales naturelles dans un périmètre de quelques centaines de mètres et sur des durées d'une à deux heures. Toutefois, les valeurs maximales modélisées (au plus fort de la turbidité durant les 20 heures de forage) sont faibles et **inférieures à 5 mg/l au-delà de 350 m du point de rejet, inférieures à 1 mg/l à plus de 2.6 km et inférieures à 0.5 mg/l à l'extérieur du périmètre du parc éolien.**

Le panache évoluera vers le nord-ouest et vers le sud-est et se dispersera rapidement une fois le forage terminé**.** Les dépôts maximums de déblais de forage sont faibles et estimés **entre de 2 à 3 mm à proximité immédiate du point de rejet et inférieurs à 1 mm à plus de 100 m de de la zone de forage**.

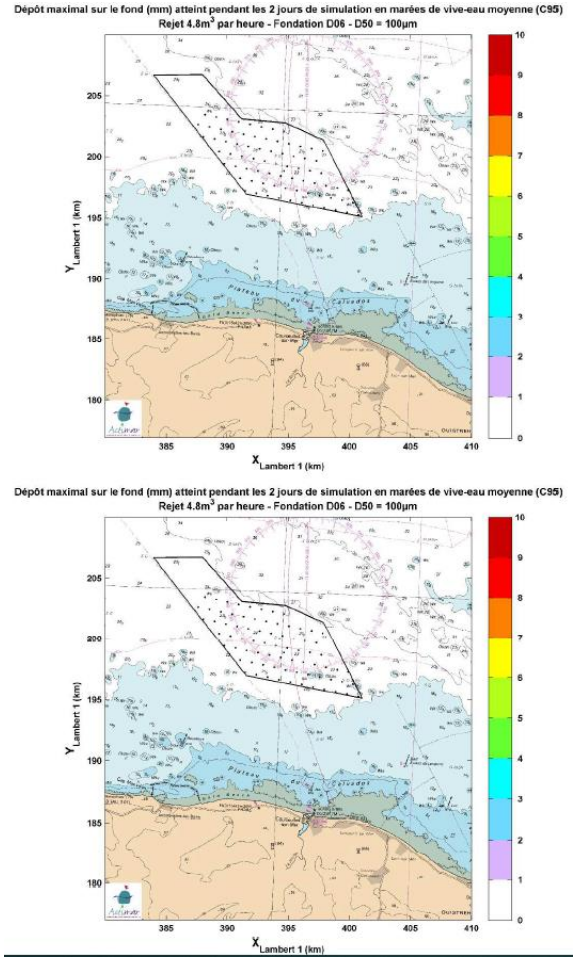


Figure 17: Dépôt maximal atteint pendant les 2 jours de simulation en marée de vive-eau moyenne(C95, en mm) pour un rejet débutant au flot (en haut) et au jusant (en bas).[18].

Lors des travaux de construction du parc éolien de Lillgrund (qui a été construit sur des fondations gravitaires en béton) des niveaux de sédiments de 10 mg / l ont été mesurés très localement sur de courtes périodes. Le dépôt de sédiments était très faible et autour d'un millimètre [20]. L'érosion des sédiments semble également limitée notamment grâce à la présence des protections anti-affouillement ne laissant apparaitre aucune érosion secondaire. Cependant, d'importantes perte de sédiments (30 à 35 %) pendant les activités de dragage et l'installation des fondations gravitaires ont été constatées en Belgique nécessitant un comblement des fosses avec le sable de la deuxième phase de développement du parc éolien.

A titre de comparaison, les activités d'extraction de granulats marins peuvent induire des panaches de plusieurs centaines de mètres avec des concentrations supérieures à 70 mg/l. Les engins de pêche peuvent également générer des concentrations de MES élevées et atteindre (cas des dragues à coquilles) des valeurs deux à trois fois supérieures (jusqu'à 60 000 mg/L) aux niveaux naturels et jusqu'à 200 mg/L à une distance de 200 m derrière l'engin [25,95].

Pendant la phase d'exploitation d'un parc éolien offshore, dans les zones où les concentrations de sédiments en suspension sont naturellement élevées, les effets de sillage (autour des fondations) peuvent créer des zones abritées avec des particules plus fines se déposant derrière les turbines [in 42]. Si les fondations des turbines sont suffisamment espacées pour réduire les effets de sillage cumulatifs, ils n'affectent pas régionalement les concentrations de sédiments en suspension [28]

Quels sont les impacts anticipés dans le contexte des parcs éoliens en mer ?

Les organismes marins caractéristiques des zones exposées aux fortes conditions hydrodynamiques sont généralement adaptés aux grandes fluctuations de turbidité. De ce fait, le degré de perturbation a généralement été évalué comme modéré [9,26] en phase de construction et négligeable en phase d'exploitation.

Wilhelmsson [67] estimait en 2010 que l'on pouvait s'attendre à des impacts sur la ressource halieutique uniquement en phase travaux et les considérait comme faibles, Bergström [9] en 2014, prévoyait des impacts (uniquement en phase construction également) faibles à moyens. Les impacts anticipés sur la ressource halieutique à l'échelle des parcs éoliens ont été jugés (en phase travaux) négligeables à moyens suivant les projets, temporaires avec une influence locale. L'augmentation de la turbidité liée aux travaux d'installation et de démantèlement des câbles génèrent des effets habituellement localisés et à court-terme. Les impacts sont, de manière générale, négligeables sur les écosystèmes marins [14,103].

Parc éolien en mer du Calvados : l'effet turbide généré par le projet

Effet turbide		
Phase		Construction
Source		battage de pieux/forage
Niveau de certitude des prédictions/estimations(1 faible à 5 élevé)		4
Échelle estimée de l'impact n.d. = Non évalué	spatiale	locale
	temporelle	court-terme
	type d'impact (English,2017)	Évitement temporaire. Recouvrement des nids de poissons et des œufs sur les fonds marins;
Degré estimé d'incidence (-) ou de bénéfice (+) des impacts pour les assemblages d'espèces dans la zone du parc éolien	Dan Wilhelmsson et al. 2010	(-) faible
	Bergström et al. 2014	(-) faible à moyen
	North Sea Power WindPark (Belgique)	(-) faible
	Morray West Wind Farm EIA (Eco)	(-) négligeable à faible
	Rampion Wind Farm EIA (En)	(-) négligeable
	Hornsea 3 Wind Farm EIA (En)	(-) faible
	Hornrev 2 Wind Farm EIA (Dan)	(-) négligeable
	Gunfleet Sands 2 Wind Farm EIA (En)	(-) faible
	Greater gabbard Wind Farm EIA (E (En)	(-) négligeable à faible
	Sheringham Shoal Wind Farm EIA (En)	(-) négligeable
	Parc éolien de St-Nazaire EI (Fr)	(-) négligeable
	Parc éolien de Dieppe - le Tréport EI (Fr)	(-) négligeable à faible
	Parc éolien de Yeu-Noirmoutier EI (fr)	(-) faible
	Parc éolien de Fécamp EI (fr)	(-) faible

Figure 18: Estimation des impacts de l'effet turbide sur la ressource halieutique dans plusieurs parcs éoliens offshores [9,67,82,83,74–81]

En résumé :

En phase de construction, les projets de parcs éoliens en mer impliquent un remaniement et une remise en suspension des sédiments lors des travaux d'installation des fondations (battage, fonçage, forage) et des câbles (tranchage, ensouillage). L'augmentation temporaire de turbidité qui en découle dépend de la granulométrie (et notamment de la fraction de particules fines, facilement remobilisables avec de faibles vitesses de chute), de l'hydrodynamisme et du type de fondations déployées.

Les mesures réalisées sur plusieurs parcs éoliens en mer indiquent que l'influence naturelle des marées et des conditions météorologiques a un plus grand impact sur la concentration des particules de sédiments en suspension que les activités de construction et d'exploitation. Les impacts anticipés de l'augmentation de la turbidité pendant la construction, ont, de manière générale été jugés négligeables à moyens suivant les projets, temporaires avec une influence très localisée.

Parc éolien en mer du Calvados : impacts anticipés de la turbidité sur la ressource halieutique

Les dernières prévisions du projet indiquent qu'au regard de la composition des sédiments (fraction de particules fines très faible) et des résultats de modélisation, l'effet turbide lié à la construction du parc sera très faible et localisé (concentrations en MES inférieures à 5 mg/l au-delà de 350 m du point de rejet, inférieures à 1 mg/l à plus de 2.6 km et inférieures à 0.5 mg/l à l'extérieur du périmètre du parc éolien). Le dépôt de particules est également estimé comme faible entre de 2 à 3 mm à proximité immédiate du point de rejet et inférieurs à 1 mm à plus de 100 m de de la zone de forage).

L'étude d'impact a évalué les conséquences de l'effet turbide généré par les activités de battage de pieux initialement envisagées mais prenant en compte également la possibilité de mise en œuvre de forages.

Concernant les poissons pélagiques, l'étude d'impact évalue que les réactions de fuite des populations de poissons hors de la zone d'influence des panaches sédimentaires seraient les plus probables (des concentrations de l'ordre du mg/l provoquant la fuite des individus). **S'agissant des espèces benthiques**, des impacts circonscrits à quelques mètres autour des fondations, des câbles et des protections anti-affouillement pour les espèces non mobiles (en fonction de leur tolérance à l'enfouissement) étaient attendues. Un comportement probable de fuite des espèces mobiles est anticipé. **Pour les espèces amphihalines**, l'étude d'impact indique une absence de perturbations directes liées à la remise en suspension lors de la phase travaux en dehors du site d'implantation où elle y est considérée comme faible. Ces espèces ont une forte tolérance à la turbidité et supportent des valeurs transitoires de matière en suspension supérieures au g/L. La turbidité de la baie de Seine est par exemple très supérieure à celle générée par les travaux**. Les impacts sur les larves d'espèces d'intérêt halieutique** liés à la remise en suspension sont estimés négatifs, directs, temporaires et faibles compte tenu des caractéristiques de l'effet turbide attendu.

L'étude d'impact du projet de Parc éolien en mer du Calvados prévoit, en phase de construction, des impacts de l'augmentation de la turbidité sur les populations halieutiques **négligeables à faibles** :

EFFET TURBIDE					
Phase	Compartiment	Evaluation des impacts			
		Positif/négatif	Direct/indirect	Durée	Intensité
construction	Espèces de poissons pélagiques	négatif	direct	temporaire	faible
	Espèces de poissons benthiques	négatif	direct	temporaire	faible
	Espèces amphihalines	négatif	direct	temporaire	négligeable
	Larves	négatif	direct	temporaire	faible
	invertébrés	négatif	direct	temporaire	faible

Figure 19 : Evaluation des impacts de l'effet turbide sur la ressource halieutique dans le cadre du projet éolien offshore de Courseulles-sur-Mer[16]

3.2.1. QU'OBSERVE-T-ON SUR LES PARCS EOLIENS EN FONCTIONNEMENT ?

Les impacts potentiels de l'effet turbide sur les organismes marins ont généralement été qualifiés de négligeables ou faibles dans les études d'impacts en s'appuyant sur les résultats des modèles hydrodynamiques de la dispersion potentielle du panache et de la sédimentation. Par conséquent, très peu d'études sur les poissons et les coquillages au regard de cette thématique ont été réalisées dans le cadre des projets de parcs éoliens en mer [10].

En Suède, en 2006, une étude expérimentale a été réalisée lors des travaux de construction du parc éolien de Lillgrund pour apprécier les impacts des travaux sur les petits poissons (juvéniles et petites espèces). Aucune réduction du nombre d'espèces n'a été constatée pendant la période de construction. Une augmentation significative de l'abondance et de la biomasse de ces petites espèces (principalement pour le gobie nageur *Gobiusculus flavescens*) a pu être observée à 150 m du site de dragage, 24 heures après les opérations. Il n'a pas été possible de déterminer si cette observation était due à un phénomène d'attraction ou de fuite des secteurs dragués [104]. D'autres études ont appréhendé les conséquences d'une augmentation de turbidité sur la distribution des poissons (parc de Storjungfrun) et n'ont montré aucun impact sur les poissons adultes et un impact limité sur les larves, sans conséquences durables [20,in 29].

Au Danemark, sur le parc de Horns Rev 1, une étude de la corrélation entre la répartition des lançons (l'un des genres les plus abondants localement : *Ammodytidae spp.*) et la composition des sédiments a été réalisée. Les études ont montré que le parc éolien était peu susceptible d'avoir eu un impact négatif sur le lançon ou tout impact sur la composition des sédiments [105].

En résumé :

Les suivis relatifs aux impacts des opérations nécessaires à la pose de fondations d'éoliennes offshore n'ont pas révélé d'impact négatif sur les juvéniles ou les adultes de poissons, dans un rayon de 150 m autour des opérations [67,104,127]. Toutefois, très peu d'études se sont intéressées à cette problématique dans la mesure ou de faibles impacts avaient été anticipés.

Parc éolien en mer du Calvados : impacts anticipés de la turbidité sur la ressource halieutique

L'effet turbide (remise en suspension et dépôt de particules sédimentaires) généré par l'installation du parc éolien en mer du Calvados sera faible, à l'instar des autres parcs éolien en fonctionnement et en comparaison d'autres activités anthropiques marines (dragage, exploitation de granulats marin, pêche etc). Au regard des retours d'expérience sur les sites opérationnels de production d'énergie éolienne en mer, les impacts de l'effet turbide sur la ressource halieutique sont attendus faibles voire imperceptibles.

Une mesure de suivi sera spécifiquement mise en œuvre pour mesurer l'effet turbide :

- ✓ **La mesure Su1** prévoit une caractérisation du panache turbide créé par les phases de travaux et les modifications éventuelles liées à la présence du parc (mesures à la sonde multiparamètres).

Sur le long terme, des mesures de suivis cibleront spécifiquement la ressource halieutique et permettront de mesurer les conséquences du projet (incluant les impacts induits par l'effet turbide) :

- ✓ **La mesure Su6** « Améliorer la connaissance de la fréquentation de la zone par l'ichtyofaune, et ses éventuelles modifications de comportements » prévoit de mesurer précisément la fréquentation de la zone et l'impact du parc éolien sur les espèces avant et après la construction. Cette mesure permettra de surveiller les évolutions de la structure des peuplements bentho-démersaux liées au parc.

- ✓ **Le suivi spécifique de la Coquille Saint Jacques** [90] sera initié en 2022 avec un état de référence. Plusieurs prélèvements permettant de mesurer la croissance et la composition chimique (isotopes et éléments traces) des individus seront réalisés. Ces données seront comparées avec les mesures réalisées sur le tracé du raccordement et les stations de référence. L'impact des travaux sur le gisement du site sera ensuite évalué grâce à l'installation en 2023 et 2024 d'une station de mesure (cage à coquilles comportant des coquilles instrumentées d'accéléromètres et des coquilles non instrumentées ; sonde multi paramètres ; enregistreur acoustique large bande). Les mesures seront réalisées entre avril et septembre (hors saison de pêche) et permettront observer le comportement des individus en phase chantier.

  Par la suite, en phase d'exploitation, des prélèvements seront réalisés avec pour objectif la mesure de la croissance et la composition chimique des coquilles Saint-Jacques.

- ✓ Le Projet de parc éolien est également **site pilote dans plusieurs programmes internationaux de surveillance de la ressource halieutique** dans le cadre des projets d'exploitation d'énergie renouvelable en mer (cf 3.1).

3.3. EFFET RECIF ARTIFICIEL

3.3.1.GENERALITES

Qu'est-ce que l'effet récif artificiel ?

Un récif artificiel est une structure qui peut imiter certaines des caractéristiques d'un récif naturel. Certaines sont introduites volontairement dans le milieu marin pour créer ou restaurer les habitats marins (modules béton, structure en acier pour l'accrétion électro minérale). Les gestionnaires des ressources marines créent, par exemple, des récifs artificiels dans les zones sous-marines qui nécessitent un support pour améliorer l'habitat des organismes récifaux. Certaines sont en revanche des empreintes des activités anthropiques. Les épaves submergées sont la forme la plus courante de récif artificiel mais les infrastructures offshore peuvent également agir en tant que tel. La présence des récifs artificiels peut changer les caractéristiques locales de l'habitat marin en introduisant des substrats artificiels durs dans des zones généralement constituées de sédiments meubles. (NOAA,[106]).

Figure 20: de gauche à droite : structure en acier pour l'accrétion electrominérale, épave (photos M.Dernouny)

Quels sont les impacts potentiels des récifs artificiels sur l'ichtyofaune et les populations associées ?

Le Ministère du développement durable proposait en 2012 la définition suivante pour décrire les conséquences de cet effet : « *Dès lors qu'un substrat dur est immergé en mer, il est rapidement colonisé par des organismes marins. La colonisation microbienne débute le plus souvent dans les heures qui suivent l'immersion et donne lieu à l'établissement d'une macrofaune sessile généralement dans un délai de quelques semaines à quelques mois. Les impacts sur la faune ne se limitent pas qu'à la faune sessile, et le récif peut être à terme également fréquenté par des populations de poissons et de crustacés qui trouvent, dans sa structure particulière, des opportunités de protection, d'alimentation et de repères d'orientation.* Les récifs artificiels peuvent induire chez les animaux des réponses d'attraction, de concentration, et de production dans certains cas, avec une augmentation de la biomasse et de la reproduction de certaines espèces (IFREMER). L'effet récif est souvent considéré comme un effet anthropique aux conséquences positives dans la mesure où l'on s'attend à observer des densités et des biomasses plus élevées de poissons et de crustacés décapodes que dans les fonds meubles environnants. Cependant, bien que les surfaces artificielles attirent les espèces colonisatrices, celles-ci ne reflètent pas nécessairement le biote environnant. Les matériaux utilisés lors de la construction ne conviennent que pour certaines espèces. En conséquence, cela peut faciliter l'introduction d'espèces sessiles non-autochtones dans une zone, ou augmenter l'abondance d'une espèce au-delà des niveaux de pré-construction et potentiellement altérer les réseaux trophiques [14,35].

Parc éolien en mer du Calvados :

Les impacts d'un récif artificiel sont supposés différents de ceux générés par les **dispositifs concentrateurs de poissons (DCP).** La position de la structure dans la colonne d'eau (fond de l'océan vs colonne d'eau/surface) et le type de réponse des poissons différencient ces deux processus: les récifs artificiels fonctionnent principalement comme un habitat pour les poissons démersaux associés aux récifs ou leurs proies épibenthiques, tandis que les DCP, comme d'autres structures de surface ou semi-aquatiques, fonctionnent principalement comme un moyen d'orientation pour les poissons en eau libre, (probablement basé sur le réflexe optique qui conduit un poisson à s'orienter vers un objet solide dans l'eau en mouvement). Les récifs artificiels peuvent simplement concentrer les individus existants mais également servir à améliorer la production régionale de poissons si l'habitat à fond dur est limité dans l'environnement local [107].

Bien que les conséquences de l'effet récifs soient bien documentées et observées, les scientifiques recommandent qu'elles soient également étudiées à plus large échelle spatio-temporelles. En effet, les effets structurels et fonctionnels s'étendent dans l'espace et dans le temps, impactant différemment les espèces tout au long de leur cycle de vie.[11]. La documentation scientifique décrivant les effets des changements hydrodynamiques (créés par les structures artificielles) sur l'établissement et la présence d'espèces benthiques dans les substrats naturels environnants est également limitée [in 108] Il est nécessaire également distinguer les impacts positifs des impacts indésirables de l'effet récif et de prendre des mesures pour promouvoir les premiers tout en atténuant les seconds. À cette fin, une bonne compréhension des mécanismes à l'origine des impacts est nécessaire afin de développer une approche efficace et inclusive de la nature [11,108].

L'éco-conception des protections contre l'affouillement pour améliorer les habitats des poissons ou la restauration des parcs à huîtres [27,109] et le déploiement de structures additionnelles (type hôtel à poissons) sont des pistes à explorer.

En résumé :

Les récifs artificiels sont des structures (c'est-à-dire des substrats durs) placées délibérément (à l'exception des épaves de navires) dans la mer qui peuvent imiter les caractéristiques des récifs naturels. C'est ce que l'on appelle communément « l'effet récif ». Ces structures fournissent de nouvelles surfaces de substrat dur (et donc de nouveaux habitats) colonisées par les organismes marins à la différence des DCP (dispositifs concentrateurs de poissons), situés en pleine eau qui ont uniquement un potentiel d'attraction.

3.3.2. L'EFFET RECIF DANS LE CONTEXTE DES PARCS EOLIENS OFFSHORES

Les récifs artificiels créés par les parcs éoliens offshores :

S'agissant des parcs éoliens offshores, les fondations, les câbles de transport électrique ou les protections anti-affouillement peuvent jouer un rôle de récif artificiel, fournissant un substrat qui peut être colonisé par des organismes sessiles, principalement suspensivore, qui à leurs tours attirent différentes espèces de poissons (pélagiques et démersales) et de crustacés [14,26,27,42,108,110,111]. Généralement moins de 1 % de la superficie d'un site de projet éolien offshore sur lequel des éoliennes sont déployées est couverte par des empreintes de structure, y compris une protection contre l'affouillement (English et al. 2017).

Parc éolien en mer du Calvados : l'effet récif généré par le projet

Le projet prévoit l'utilisation de fondations monopieu pour ancrer les éoliennes. Une couche de matériaux rocheux (gabarit compris entre 40 et 80 kg par bloc) pourra être mise en place en périphérie de la fondation afin d'assurer une protection anti-affouillement de l'assise.

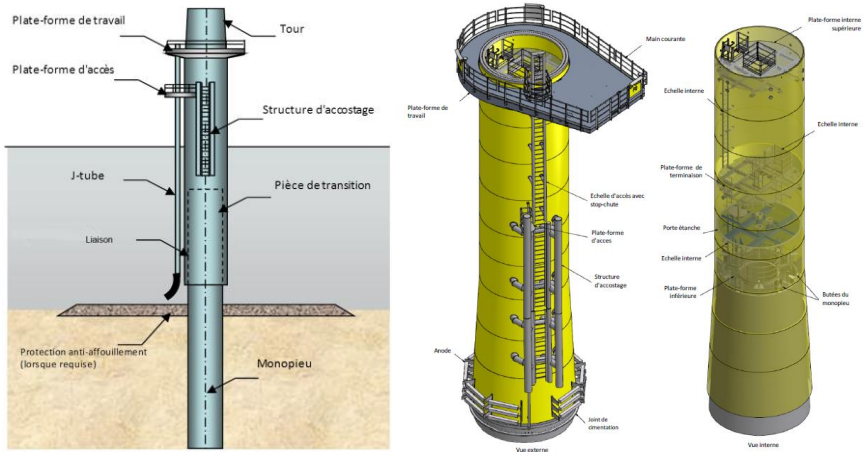


Figure 21: Principe d'une fondation de type monopieux et de sa pièce de transition[16]

Le tableau suivant présente des valeurs indicatives de dimensions et caractéristiques des fondations :

Monopieu	Caractéristiques
Diamètre	de 6,50 à 7,50 mètres
Epaisseur	Variable le long de la fondation, de 40 à 150 mm
Longueur	de 50 à 70 mètres en fonction de la bathymétrie et de la nature des sols
Profondeur d'ancrage	de 20 à 30 mètres en fonction de la nature des sols
Poids	de 700 à 950 tonnes en fonction de la bathymétrie et de la nature des sols
Pièce de transition	**Caractéristiques**
Diamètre	de 7 à 7,50 mètres à la base, et 6 mètres au sommet
Epaisseur	de 40 à 150 mm
Longueur	25 mètres environ
Poids	350 tonnes environ
Elévation de la plate-forme de travail	19,4 m CM environ
Protections anti-affouillement (si requises)	**Caractéristiques**
Distance recouverte autour du pieu	10 mètres environ
Epaisseur moyenne	1,5 mètre
Matériaux	Enrochement 40-80 kg

Figure 22: Caractéristiques des fondations monopieux(valeurs indicatives)

La sous-station électrique sera implantée sur une fondation de type Jacket. Les câbles de transport électrique seront ensouillés sur la majorité du linéaire. Suivant le mode de protection des câbles électriques et l'implantation éventuelle de protection anti-affouillement, l'emprise des structures artificielle sera comprise entre 0,0158 et 0,342 km², soit entre 0,032 et 0,68 % de l'emprise globale du parc éolien.

Quels sont les impacts anticipés dans le contexte des parcs éoliens en mer ?

Les fondations des turbines introduites sont des substrats durs (béton et métal) qui sont rapidement colonisés par des communautés d'espèces épigées [112]. Par la suite, la faune mobile comme les crustacés, les mollusques et les poissons fourrages trouvent refuge près du substrat introduit et présentent souvent des densités plus élevées par rapport aux environs [106,113].

Les protections anti-affouillement représentent une grande partie de l'emprise artificielle des parcs éoliens offshore et sont souvent constituées de roches positionnées sur le fond marin pour empêcher l'érosion. En tant que tel, la protection contre l'affouillement peut ressembler à un récif rocheux marin et pourrait avoir d'importantes fonctions écosystémiques. [27].

Les câbles sous-marins non enterrés et les protections associées peuvent créer des récifs artificiels. Ces structures sont colonisées par des espèces benthiques de substrat dur, y (épifaune et macrofaune mobile) et peuvent également attirer une mégafaune mobile, comme des décapodes ou des poissons [14]

Figure 23: colonisation sur et autour du mât de mesure de Fécamp

Parc éolien en mer du Calvados : impacts anticipés de l'effet récif sur la ressource halieutique

Les impacts anticipés de l'effet récif à l'échelle des parcs éoliens ont été estimés permanents et localisés avec dans la plupart des cas des conséquences positives sur la ressource halieutique. Des impacts négatifs négligeables à faible (risque de développement d'espèces non-indigènes ou invasives, ou de modification des réseaux trophiques) ont également été suspectés.

Effet récif		
phase		Exploitation
Source		infrastructures immergées
Niveau de certitude des prédictions/estimations (1 faible à 5 élevé)Dan Wilhelmsson et al. 2010		3
Échelle estimée de l'impact n.d. = Non évalué	spatiale	locale
	temporelle	long-terme
	type d'impact (English,2017)	Réduction de la superficie totale des habitat d'espèces. Attraction
Degré estimé d'incidence (-) ou de bénéfice (+) des impacts pour les assemblages d'espèces dans la zone du parc éolien	Dan Wilhelmsson et al. 2010	(+) moyen
	Bergström et al. 2014	(+) moyen
	North Sea Power WindPark (Belgique)	(-+) négligeable à positif
	Morray West Wind Farm EIA (Eco)	(-) négligeable à faible
	Rampion Wind Farm EIA (En)	(+) moyen
	Hornsea 3 Wind Farm EIA (En)	(+) faible
	Hornrev 2 Wind Farm EIA (Dan)	(-+) faible
	Gunfleet Sands 2 Wind Farm EIA (En)	(-) négligeable à (+) faible
	Greater gabbard Wind Farm EIA (E (En)	(+) négligeable à moyen
	Sheringham Shoal Wind Farm EIA (En)	(+) faible
	Parc éolien de St-Nazaire EI (Fr)	(+) négligeable à positif
	Parc éolien de Dieppe - le Tréport EI (Fr)	(+) négligeable à positif
	Parc éolien de Yeu-Noirmoutier EI (fr)	(+) positif
	Parc éolien de Fécamp EI (fr)	(+) positif

Figure 24: Estimation des impacts de l'effet récif sur la ressource halieutique dans plusieurs parcs éoliens offshore [9,67,82,83,74–81]

En résumé :

Les fondations, les protections anti-affouillement et les câbles électriques non-enterrés constitutifs des parcs éoliens offshores sont considérés comme des récifs artificiels. Ils représentent moins de 1 % de la superficie d'un site de projet éolien offshore. Ces structures peuvent être colonisées par la faune benthique et attirer par la suite la mégafaune (poissons, crustacés, céphalopodes…). Des changements en termes de structure des peuplements marins peuvent se produire avec des conséquences potentielles estimées positives (augmentation de la richesse et la diversité spécifique, des abondances et de la biomasse) et négatives (modification des réseaux trophiques, introduction d'espèces invasives).

Parc éolien en mer du Calvados : impacts anticipés de l'effet récif sur la ressource halieutique

L'étude d'impact réalisée dans le cadre du projet de parc éolien en mer de Courseulles-sur-Mer prévoit, en phase d'exploitation, un effet récif sur les fondations, les protections des câbles inter-éoliennes et les protections anti-affouillement avec en conséquence un développement de biocénoses benthiques. Durant les premiers mois, les structures ne serviront que d'abri ou de support avant l'installation d'une ensuite d'une production de matière organique. La complexification des maillons trophiques sur, autour et dans le récif permettra à la structure de devenir productrice de biomasse.

Indirectement, un impact permanent (attractions/développement des espèces pélagiques au niveau des fondations, des espèces benthiques au niveaux des protections de câbles et anti-affouillements) est attendu sur les populations halieutiques.

EFFET RECIF					
Phase	Compartiment	Evaluation des impacts			
		Positif/négatif	Direct/indirect	Durée	Intensité
construction	Espèces de poissons pélagiques	positif	indirect	permanent	faible
	Espèces de poissons benthiques	positif	indirect	permanent	faible
	Espèces amphihaline	/	/	/	/
	Larves	positif	direct	permanent	négligeable
	invertébrés	positif	indirect	permanent	faible

Figure 25 : Evaluation des impacts de l'effet récif sur la ressource halieutique dans le cadre du projet éolien offshore de Courseulles-sur-Mer

Une mesure de suivi (SU15) ciblant les effets directs et indirects des EMR sur le réseau trophique à travers l'exemple du projet éolien en mer du Calvados a d'ores et déjà été mise en œuvre aboutissant à l'élaboration d'une thèse intitulée « *Approche écosystémique des Energies Marines Renouvelables : étude des effets sur le réseau trophique de la construction du parc éolien au large de Courseulles-sur-mer et du cumul d'impacts* » et portée par l'Université de Caen. Basé sur une approche écosystémique des Energies Marines Renouvelables, ce travail a combiné plusieurs outils de modélisation afin de :

- ✓ Caractériser le fonctionnement et la structure de l'écosystème du site d'implantation du parc
- ✓ Tester des scénarios d'évolution possible du fonctionnement trophique du système.

Un modèle de réseau trophique et plusieurs scénarios (intégrant les effets cumulés avec les autres activités anthropiques) ont été construits afin d'analyser les conséquences de l'effet récif et réserve générées par le parc sur l'écosystème.

Les résultats obtenus mettent en évidence une forte certitude sur le fait que la création du parc éolien générera un effet récif sur les espèces benthiques et les poissons (se nourrissant de ces derniers). Les réponses des top-prédateurs sont, en revanche, moins nettes.[114,115]. Les résultats ont mis en évidence que l'effet récif est supposé augmenter l'activité du système et certains processus écologiques tels que l'activité de recyclage.

3.3.3. QU'OBSERVE-T-ON SUR LES PARCS EOLIENS EN FONCTIONNEMENT ?

En Belgique, une décennie de suivis écologiques de la faune benthique sur les parcs de C-power et Belwind a mis en évidence les conséquences de cet effet récif qui se sont traduites, dans un premier temps, par une colonisation des fondations (fondations gravitaires et monopieux) par la faune benthique en trois étapes successives. Une colonisation rapide et l'établissement d'un stade pionnier (~2 ans) a précédé un stade intermédiaire plus diversifié et caractérisé par un grand nombre de suspensivores (*Jassa herdmani*). Un troisième stade (peut-être le « climax ») dominé par l'œillet de mer (*Metridium sénile*), a été atteint après dix ans sur les fondations gravitaires tandis que l'assemblage sur l'acier des monopieux sur le site le plus offshore (neuf ans après la construction) a été décrit comme un assemblage co-dominé par l'œillet de mer et les moules bleues (*Mytilus edulis*) [42].

Les suivis halieutiques ont parallèlement permis d'observer, lors des 4 premières années d'exploitation du parc, l'installation d'une communauté spécifique près des fondations gravitaires dominée par le tacaud (*Trisopterus luscus*) et le cabillaud (*Gadus morhua*). D'autres espèces telles que le capelan (*Trisopterus minutus*), le lieu noir (*Pollachius virens*) et la dorade grise (*Spondyliosoma cantharus*) ont été exclusivement détectées proche des fondations. Pour certaines espèces, les densités mesurées étaient très importantes. En effet, les captures de cabillaud et de tacauds étaient alors 12 à 30 fois plus élevées que sur les épaves environnantes et jusqu'à plus de 100 fois plus élevées que sur les zones sableuses avec une population composée majoritairement par des juvéniles [41,106].

En 2018 (soit 9 ans après le début de la construction du parc C-power), 25 espèces de poissons étaient établies à proximité immédiate des éoliennes avec une composition relativement unique en comparaison avec les bancs de sable environnants. Certaines espèces étaient, par exemple, habituellement observées dans les parcs à huîtres et les champs de blocs rocheux côtiers : le poisson têtard *Raniceps rani-nus*, la blennie Gattorugine (*Parablennius gattorugine*), la vieille commune (*Labrus bergylta*), et le chabot buffle (*Taurulus bulbalis*). La zone de concession la plus proche du rivage (environ 23 km) présentait des densités beaucoup plus élevées et une composition différente des zones de concession plus au large. [116]. Une étude des contenus stomachaux couplée à des analyses des isotopes stables a révélé que le chabot buffle (*Myoxocephalus scorpioides*), le cabillaud (*Gadus morhua*) et le tacaud (*Trisopterus luscus*), utilisent les parcs éoliens offshores comme aires d'alimentation pendant des périodes prolongées et se nourrissent majoritairement d'organismes épiphytes (*Jassa herdmani*) et de décapodes, (*Pisidia longicornis*) [30]. Les préférences alimentaires à long terme des espèces benthiques et benthopélagiques contribuent à l'hypothèse que les récifs artificiels des parcs éoliens pourraient potentiellement augmenter la production de poissons dans la région.[30]

Les conséquences de l'effet récif artificiel semblent également en expansion dans la mesure ou en 2020 (onze ans après la mise en service), une augmentation du nombre des espèces associées au substrat dur (comme le crabe de porcelaine à longues pinces *Pisidie longicornis,* le tourteau *Cancer pagurus* et le bar commun *Dicentrarchus labrax)* était constatée[13]. Des densités plus importantes de calmar commun (*Loligo vulgaris*) ont été également été observés sur le Parc C-Power, probablement en raison de l'utilisation des fondations Jackets qui pourraient agir comme substrats pour la ponte des œufs [13].

Parc éolien en mer du Calvados : impacts anticipés de l'effet récif sur la ressource halieutique

La figure illustre la colonisation des fondations des turbines par les organismes marins observée par les chercheurs belges :

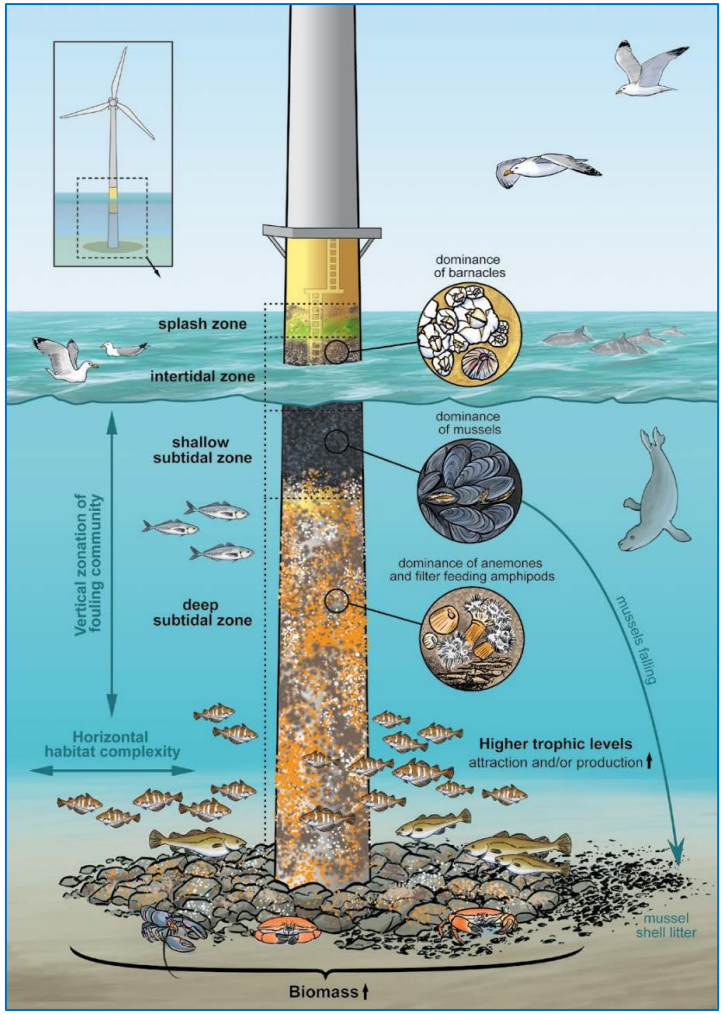


Figure 26: Illustration de de la colonisation des fondations des turbines par les organismes marins. Dessin par Hendrik Gheerardyn [in 11]

Les chercheurs Belges se sont également intéressés aux impacts sur les communautés de poissons des sédiments meubles (entre les turbines). Les suivis ont montré des variations significatives en termes de densités au cours des premières années après la construction. [13]. On constatait alors une augmentation des tailles moyennes du merlan *Merlangius merlangus* en bordure du Parc Eolien de C-Power et une augmentation temporaire des abondances de soles (*Solea solea)* et de limandes (*Limanda limanda)* en bordure du parc de Belwind. A l'intérieur des parcs éoliens, plusieurs impacts locaux et temporaires avaient été détectés comme une augmentation de la taille moyenne (limande, plie, turbot), des densités (sole commune) et du nombre d'espèces de poissons démersaux [41]. Après 9 ans de suivi, les résultats indiquent que l'écosystème des sédiments meubles entre les turbines (à des distances > 200 m) n'a pas vraiment changé et que l'assemblage (richesse spécifique et densités) d'espèces au sein des parcs éoliens offshores semble être principalement structuré par les variabilités temporelles dont les mécanismes s'expriment à des échelles spatiales plus grandes (par exemple, les fluctuations de températures, les changements hydrodynamiques, les blooms planctoniques, l'oscillation Nord Atlantique etc.) [13].

En Allemagne, sur le parc Alpha Ventus, les impacts de l'effet récif ont été constatés après l'implantation des fondations. Une augmentation forte et régulière de la richesse spécifique et la biomasse de la faune épibenthique était alors mesurée sur les nouveaux substrats. Les suivis halieutiques ont également mis en évidence une colonisation des fondations par une communauté de poissons (maquereaux, dragonnets rayés, cabillauds, poissons plats et certains poissons prédateurs rares sur les surfaces de sable pur). En 2011, (soit deux ans après la fin de la construction), les abondances des poissons et des crabes étaient plus importantes autour des fondations que dans les zones adjacentes. Les contenus stomacaux ont révélé que l'alimentation des maquereaux et des chinchards était principalement constituée de poissons juvéniles et non des espèces associées aux substrats durs des fondations[32].

Parc éolien en mer du Calvados : impacts anticipés de l'effet récif sur la ressource halieutique

En 2012 et 2013, les chercheurs mesuraient une colonisation massive de jeunes tourteaux (*Cancer Pagurus*) autour des fondations (plus de 2300 individus à l'intérieur du parc contre 29 individus dans les zones de référence). [32,37,117].

En phase d'exploitation, les contenus stomacaux de maquereaux ont été estimés moins remplis dans la zone du parc éolien (en comparaison avec les deux zones de référence) ce qui traduit une alimentation moins importante dans la zone du parc. Plusieurs hypothèses ont été associées à cela (perturbation du comportement alimentaire lié aux bruits, aux vibrations, aux perturbations des courants à proximité des fondations, biais dans l'échantillonnage). En revanche, une étude acoustique menée sur les parcs de Global Tech I / BARD Offshore 1 n'a montré aucun impact des parcs sur la répartition des poissons pélagiques (à priori hareng et sprat) [36].

En Suède, les résultats du suivi avant (4 ans) et après (3 ans) l'établissement du parc éolien de Lillgrund ont identifié des densités plus élevées près des fondations pour quatre des espèces de poissons les plus courantes, à savoir le cabillaud, l'anguille, le chabot buffle et le cténolabre rupestre [118]. Les estimations de la taille des populations à Lillgrund ont permis de comprendre que la blennie vivipare n'avait ni été attirée ni évité le parc éolien offshore [119]. Une étude sur le crabe vert indique qu'il n'y a pas non plus eu de conséquence évidente de l'effet récif artificiel pour cette espèce, mais un possible effet de débordement sur les habitats voisins. Aucun impact sur la morphologie, le sex-ratio ou l'état des individus n'a pu être démontré par ailleurs [120].

A l'échelle plus large, les résultats du suivi n'ont indiqué aucun impact majeur sur la diversité et l'abondance des poissons benthiques lors de la comparaison de la zone du parc éolien avec les zones de référence. Des changements dans l'abondance de certaines espèces, ainsi que dans la composition des communautés ont été observés au fil du temps, mais des changements similaires se sont produits en parallèle dans au moins une des zones de référence. Les communautés de poissons benthiques dans la zone du parc éolien étaient principalement guidées par les mêmes facteurs environnementaux que ceux des zones environnantes [118].

Au Danemark : La construction de Horns Rev I en 2003 a entraîné des changements dans la structure du peuplement piscicole et dans les abondances de poissons à l'intérieur du parc éolien. Les sept années de suivi post-construction ont mis en évidence l'absence d'impacts négatifs à long terme pour les espèces clés (comme le merlan *Merlangius merlangus*, la limande *Limanda limanda* et les lançons *Ammodytidae spp.)* ou les groupes de poissons fonctionnels. De manière générale, l'abondance globale des poissons a légèrement augmenté dans la zone intra-parc, mais a diminué dans la zone de référence à 6 km [39,121] .

Un phénomène d'attraction des poissons vers les fondations et une plus grande diversité intra-parc (41 espèces contre 31 dans les zones de références) a parallèlement a été observée. Certaines espèces (le cténolabre rupestre *Ctenolabrus rupestris*, la lompe *Cycloplerus lumpus et* la blennie vivipare *Zoarces vivipares)* ont été exclusivement détectées près des turbines [122]. Il a été déterminé que les communautés benthiques (notamment le crustacé *Jassa marmorata* et le crabe *Pisidia longicornis*), présentes sur les structures artificielles du parc éolien, servaient de proies au tacaud (*Trisopterus luscus*) et au cténolabre rupestre [106].

Les abondances des poissons de roche se sont avérées maximales à proximité des turbines tandis les merlans fréquentaient préférentiellement les espaces inter-éoliennes. Les auteurs rapportent que les structures récifales artificielles étaient suffisamment grandes pour attirer des espèces de poissons typiques des substrats rocheux, mais pas assez pour avoir des impacts négatifs sur les espèces caractéristiques des fonds sableux d'origine, entre les turbines [39].

Parc éolien en mer du Calvados : impacts anticipés de l'effet récif sur la ressource halieutique

Au Royaume-Uni, sur le parc de North Hoyle, la colonisation des turbines par les organismes benthiques a été observée après la construction. En parallèle, de grands bancs de juvéniles de merlan (*Merlangius merlangus)* se sont établis autour de toutes les structures sous-marines. Les individus semblaient se nourrir de l'amphipode *Jassa falcata*. [123].

Figure 27: Banc de jeunes merlans se nourrissant de l'amphipode tubicole Jassa falcata sur le parc éolien de North Hoyle (RU). (Photographie : npower renouvelables[in 123]*).*

Sur le parc de Westermost Rough, les études ont démontré des variations dans les principaux stocks commerciaux de crustacés autour du parc, au cours de la période de construction de cette installation. Certains de ces changements peuvent être attribuables à la présence du parc, certains peuvent être le résultat de l'exclusion temporaire de l'effort de pêche sur le site et d'autres encore peuvent être le produit de variations naturelles sans aucun lien avec le projet. Un an après la construction, il y avait une proportion plus élevée de homards plus gros dans le réseau de turbines, mais une plus grande proportion de homards plus petits sur le site témoin associé. La tendance inverse a été observée autour du câble électrique principal et son site témoin. Les populations de tourteaux/étrilles semblaient varier en réponse aux tendances de l'abondance du homard, mais les auteurs estimaient alors qu'une étude plus approfondie était nécessaire pour mieux comprendre cette relation et son impact sur les données de capture [35]. La taille moyenne des homards avait augmenté depuis la réalisation de l'état initial mais l'abondance des tourteaux avait diminuée. Un pourcentage plus élevé de homards femelles capturées en 2015 étaient ovigères, sauf dans les classes de taille plus grandes dans la région extracôtière. [35]. En 2017, pour les trois espèces de crustacés étudiés (homards, tourteaux, étrilles), les résultats montraient peu de variation dans la structure de la population entre les sites de référence et les zones concernées par le parc éolien. Cependant, les auteurs précisent que d'autres facteurs (obligation d'installation d'ouvertures sur les engins de pêche professionnelle pour permettre aux petites prises de s'échapper des casiers) peuvent avoir légèrement influencé les résultats de ces suivis et une étude plus approfondie est nécessaire pour évaluer si le parc éolien peut servir de zone d'alevinage pour les crustacés juvéniles et si l'effet de concentration de poissons autour des turbines influence les populations locales de crustacés [31]. Entre 2013 et 2015, une augmentation de l'abondance du cabillaud (*Gadus morhua*) avait en effet été observée [35]. Les suivis écologiques du parc de Scoby Sand ont identifié 1 an après la construction un effet d'attraction des turbines installées. [124].

Aux Pays bas, les études conduites sur le parc éolien Egmond aan Zee ont montré, dès le stade état initial, de fortes variations à la fois spatiales et temporelles dans les communautés de poissons. Seuls des impacts mineurs sur les assemblages de poissons, en particulier près des fondations ont été observés après la construction. Certaines espèces de poissons, comme la morue, ont semblé trouver refuge à l'intérieur du parc deux ans après la construction. Des observations par vidéo ont permis de supposer que les substrats artificiels pouvaient servir également d'abri et de réserve de nourriture pour le cabillaud (*Gadus morhua*) et le tacaud (*Trisopterus lucus*)[8].

Parc éolien en mer du Calvados : impacts anticipés de l'effet récif sur la ressource halieutique

Aux USA, les études menées sur le parc de Block Island ont mis en évidence, les quatre premières années, une colonisation des structures de fondations par la faune benthique (et notamment le développement des bivalves) et de nombreuses espèces indigènes de poissons. A plus large échelle, les variations d'abondances de poissons et de mollusques céphalopodes et de crustacés ont été cohérentes (augmentation-diminution) entre les stations de références et les zones intra-parc. Un fait remarquable a cependant été mesuré dans la zone du parc et caractérisé par une augmentation (plus de 1 200 %) des abondances de bars noirs (*Centropristis striat*) entre l'état initial et la phase d'exploitation. Les changements dans les zones de références sur la même période étaient plus modestes. Concernant le calmar, les observations ont montré une diminution des abondances après la construction dans les secteurs du parc mais parallèlement une diminution (d'ampleur légèrement plus importante) a été enregistrée dans les zones de référence [125].

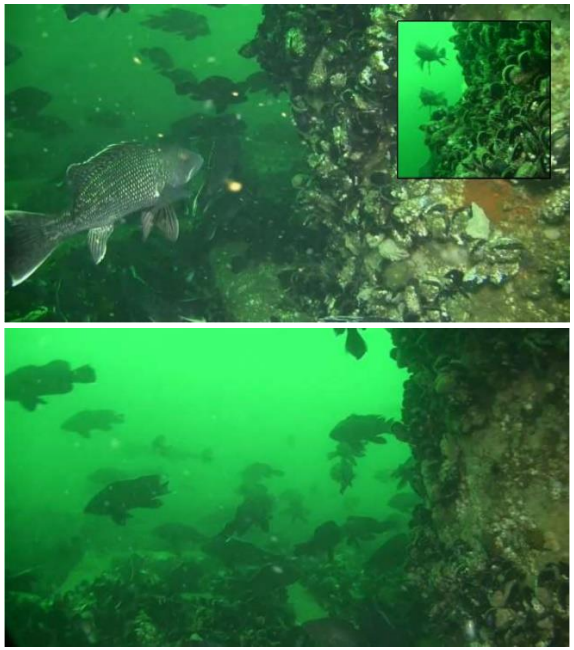


Figure 28: Colonisation des fondations du parc éolien de Block Island (USA) par le bar noir (Centropristis striata) quatre ans après la construction [126]

En résumé :

En phase d'exploitation des parcs éoliens, la plupart des suivis à court et long-termes ont observé des impacts de l'effet récif artificiel sur les organismes marins. Dans un premier temps, une colonisation pionnière (en plusieurs stades successifs) des structures artificielles par la faune benthique (anémones, petits crustacés et moules etc) intervient, suivie par le développement d'une communauté de poissons et grands crustacés dont la diversité et les abondances peuvent s'avérer importantes et parfois supérieures aux fonds durs environnant. En Europe du Nord, ces structures semblent particulièrement favorables aux gadidés (cabillaud, tacaud, juvéniles de merlans). Les suivis suggèrent que ces conséquences continuent de s'étendre sur le long-terme (augmentation de la richesse spécifique et des densités mesurées) et qu'une réelle production biologique s'opère autour des structurent artificielles.

Parallèlement, les suivis à plus large échelle ont révélé des structures de peuplements piscicoles dans les zones intra-parc équivalentes (voire plus favorables) aux secteurs de références adjacents.

Parc éolien en mer du Calvados : impacts anticipés de l'effet récif sur la ressource halieutique

Si l'on se réfère aux retours d'expérience des parcs éoliens offshore en fonctionnement en Europe du Nord d'une part et aux résultats issus des modèles de réseaux trophiques (étude réalisée avec l'exemple du projet de Courseulles-sur-Mer) d'autre part, la présence sur le fond marin des fondations des turbines du futur parc éolien en mer du Calvados conduira en toute vraisemblance à un effet récif en phase d'exploitation.

Comme la plupart des suivis à court et long-termes l'ont observé, la colonisation des structures artificielles par la faune benthique se déroulera en plusieurs stades successifs. Par la suite il est attendu le développement d'une communauté diversifiées de poissons et crustacés inféodés aux substrats durs autour des infrastructures, le tout aboutissant à une réelle production biologique.

Plusieurs mesures de suivi permettront d'évaluer l'ampleur de l'effet récif et ses conséquences sur l'ichtyofaune, la carcinofaune et la malacofaune :

- ✓ **Mesure de suivi Su3 :** cette mesure prévoie de suivre l'effet récif au moyen d'une bio-évaluation de la faune benthique (prélèvements à la benne Hamon) et de comptages et observation visuelles (ROV ou plongée). Ce travail permettra d'évaluer les changements de substrat et l'évolution des communautés benthiques. Les communautés de poissons, suivies spécifiquement par ailleurs (mesure SU6), pourront également être observées lors de ces campagnes.
- ✓ **Mesure « SU6 :** cette mesure prévoit d'évaluer la fréquentation de la zone et l'impact du parc éolien sur les espèces avant et après la construction. A l'instar des suivis menés sur les parcs Européens cette mesure permettra de surveiller les évolutions de la structure des peuplements bentho-démersaux liées au parc. Elle permettra notamment de détecter d'éventuelles conséquences de l'effet récifs sur les populations inféodées au sédiments meubles entre les turbines.

3.4. EFFET RESERVE

3.4.1.GENERALITES

Qu'est-ce que l'effet réserve ?

Dans les zones marines où les usages sont réglementés ou interdits, la réduction des pressions sur les espèces et les habitats d'espèces résulte en un effet positif global sur les écosystèmes : l'effet réserve. Ces restrictions sont désignées sur un périmètre spécifique qui constitue les limites de ladite réserve. Dans le cadre de projets d'énergies marines renouvelables, le périmètre correspond directement aux zones du projet sur lesquelles sont émises ces restrictions d'usage [127].

Quels sont les impacts potentiels de l'effet réserve sur l'ichtyofaune ?

Les réserves marines sont largement reconnues comme un outil de conservation [128] et peuvent pérenniser les ressources halieutiques côtières surexploitées[129]. On constate en effet que certaines populations surexploitées de poissons se rétablissent et s'améliorent (abondances et taille moyenne plus importantes) en l'absence, notamment d'activités de pêche. Les caractéristiques et le contexte des réserves (usages, restrictions, effort de pêche ne dehors des réserves) jouent un rôle clé dans l'efficacité du dispositif[130].

En résumé :

L'effet réserve est lié à la limitation/interdiction par les autorités des activités humaines potentiellement impactantes (navigation, pêche, mouillage, dragage, etc.) sur un territoire marin. En fonction des caractéristiques et du contexte du territoire concernée un impact positif sur les ressources halieutiques (augmentation des abondances et des tailles moyennes) peut être observé.

3.4.1. L'EFFET RESERVE DANS LE CONTEXTE DES PARCS EOLIENS OFFSHORES

L'effet réserve dans les Parcs Eoliens offshore :

Les parcs éoliens en mer ont le potentiel d'agir comme des zones de réserve *de facto*, en rendant une partie ou la totalité de leur emprise inaccessible aux navires de pêche [35]. Réglementée au cas par cas, il n'y a pas d'approche générale sur les stratégies de gestion de la pêche et de l'aquaculture dans les parcs éoliens offshores [26]. Dans de nombreux pays, les navires de pêche ne sont pas autorisés à pénétrer dans les parcs éoliens offshore. Des interdictions ont préexisté à la MSP (Marine spatial Planning ou Planification Spatiale Marine) et ont, dans certains cas, été reprises dans les transpositions nationales de la MSP (com pers). La pêche passive (et parfois la pêche active) et le transit sont, sous certaines restrictions, autorisés au Royaume-Uni, en Allemagne, en Belgique et aux Pays-Bas, mais interdits au Danemark [26].

Parc éolien en mer du Calvados : l'effet réserve généré par le projet

Le design du projet a été pensé pour favoriser la pratique de la pêche professionnelle au sein du parc éolien de Courseulles-sur-Mer :

- ✓ Les éoliennes sont à près de 5 MN à l'Est de la bouée de Cussy, une des zones de concentration principale de la coquille Saint-Jacques, et au sud de l'épave du Fort Norfolk, lieu de passage privilégié des navires de pêche
- ✓ Les éoliennes sont positionnées suivant l'axe 100° correspondant au courant de marée, ce qui permet de définir des couloirs de travail entre deux alignements, avec une distance de près de 1 000 mètres entre deux lignes d'éoliennes
- ✓ Le schéma de raccordement électrique favorise le raccordement des éoliennes dans le sens du courant et limite ainsi strictement les traversées de câbles entre lignes d'éoliennes
- ✓ Le nombre total d'éoliennes est limité du fait de l'optimisation de la puissance par éolienne installée

Les effets du projet sur les pratiques de pêche (arts traînants et dormants), compte tenu des limitations d'usages proposées, sont estimés directs, permanents et faibles dans l'étude d'impact du projet.

Concernant les arts trainants, la perte liée à l'occupation spatiale des éoliennes et des distances de sécurité par rapport aux câbles et à la zone de regroupement des câbles près du poste électrique sera limitée à environ 25 km². La perte d'accès à la ressource sera limitée et ces conditions permettront à l'activité de pêche de continuer à se dérouler au sein des couloirs, entre les alignements d'éoliennes.

Concernant les arts dormants, La perte d'accès à la ressource ne sera pas très importante du fait que ces métiers sont peu pratiqués sur le site d'implantation d'une part et que seuls quelques secteurs seront interdits à la pêche (le couloir du poste électrique et une zone d'exclusion de 50m autour de chaque éolienne).

Dans la mesure ou une partie du territoire sera interdite à la pêche, un effet réserve est possible. Il pourra cependant être limité dans la mesure ou les pratiques seront autorisées sur une majeure partie du territoire concerné par le projet.

Quels sont les impacts anticipés dans le contexte des parcs éoliens en mer ?

L'emprise d'un parc éolien peut devenir une réserve marine du fait de l'exclusion de la navigation et de l'activité de pêche. Les conséquences possibles sont une augmentation locale de l'abondance des proies pour les prédateurs supérieurs, et parallèlement, une diminution du risque de captures accessoires dans les engins de pêche (Les restrictions de l'activité de pêche limitent les captures des espèces ciblées mais aussi des espèces non-ciblées) [8].

Ces zones de réserves peuvent également favoriser le recrutement et la migration dans les zones de pêche adjacentes (effet *spill-over*) [1]. Concernant les juvéniles et les adultes, la concentration dans les réserves marines conduit à une compétition inter et intra-spécifique accrue. Pour échapper à ce phénomène, certains individus se déplacent vers des zones de moindre compétition et colonisent ainsi de nouveaux espaces. C'est principalement par ce processus d'exclusion compétitive que l'effet réserve peut rayonner au-delà du strict périmètre de protection et notamment profiter à la pêche [in 127].

Cependant, on ne sait pas ce que les changements observés entrainent pour les stocks de poissons, au niveau des populations et à une échelle régionale plus large. Par conséquent, on ne sait pas quels sont les avantages pour la pêche, et des recherches plus spécialisées sont nécessaires. Il est nécessaire de caractériser à plus large échelle (à l'échelle de la gestion des ressources marines) les impacts des parcs éoliens offshores sur la biodiversité, la composition des espèces et les caractéristiques des habitats .[26].

Les impacts anticipés de l'effet réserve à l'échelle des parcs éoliens ont été estimés permanents avec dans la plupart des cas des conséquences potentiellement positives sur la ressource halieutique à une large échelle (Figure 29).

Effet réserve		
Phase		**Exploitation**
Source		Restriction des usages
Niveau de certitude des prédictions/estimations (1 faible à 5 élevé) Dan Wilhelmsson et al. 2010		5
Échelle estimée de l'impact n.d. = Non évalué	spatiale	large
	temporelle	long-terme
	type d'impact (English,2017)	Réduction de la superficie totale des habitat d'espèces. Attraction
Degré estimé d'incidence (-) ou de bénéfice (+) des impacts pour les assemblages d'espèces dans la zone du parc éolien	Dan Wilhelmsson et al. 2010	(+) fort
	Bergström et al. 2014	(+) moyen à fort
	North Sea Power WindPark (Belgique)	/
	Morray West Wind Farm EIA (Eco)	/
	Rampion Wind Farm EIA (En)	/
	Hornsea 3 Wind Farm EIA (En)	(+) négligeable à faible
	Hornrev 2 Wind Farm EIA (Dan)	/
	Gunfleet Sands 2 Wind Farm EIA (En)	(+) négligeable
	Greater gabbard Wind Farm EIA (E (En)	(+) moyen
	Sheringham Shoal Wind Farm EIA (En)	/
	Parc éolien de St-Nazaire EI (Fr)	(+) négligeable
	Parc éolien de Dieppe - le Tréport EI (Fr)	(+) négligeable à positif (faible)
	Parc éolien de Yeu-Noirmoutier EI (fr)	(+) négligeable à positif (faible)
	Parc éolien de Fécamp EI (fr)	(+) positif

Figure 29: Estimation des impacts de l'effet réserve sur la ressource halieutique dans plusieurs parcs éoliens offshores [9,67,82,83,74–81]

Parc éolien en mer du Calvados : impacts anticipés de l'effet réserve sur la ressource halieutique

Compte tenu de la possibilité envisagée de pratiquer la pêche au sein du territoire du parc, l'effet réserve sera probablement limité (exception faite du corridor Nord-sud du poste électrique en mer, zone de convergence des câbles inter-éoliennes vers le poste électrique, où toute pêche sera interdite). L'étude d'impact du projet indique toutefois que :

- ✓ Les zones interdites à la pêche aux arts trainants favoriseront le développement de ressources halieutiques au sein de la réserve et qui, par effet de transfert pourra gagner la zone périphérique, de nature à y accroître les captures par unité d'effort. L'ampleur dépend des stocks considérés et de l'intensité de la mortalité par pêche au sein de la zone périphérique. L'existence d'une zone où la ressource est à l'abri de la mortalité par pêche peut également être considérée comme une application du principe de précaution en réduisant le risque d'effondrement accidentel ou naturel de la pêcherie par la constitution d'un stock « tampon ».
- ✓ Les fondations et les enrochements pourront représenter un refuge en fonction des activités de pêche qui seront autorisées (arts dormants et trainants) et le pourcentage d'exploitation de la zone par rapport à la situation initiale où l'activité de pêche se pratiquait sur la totalité du site.
- ✓ La présence du parc éolien et les contraintes d'accès qui y seront associées, entraîneront de fait une diminution de l'effort de pêche à la coquilles Saint-Jacques (*Pecten maximus*) sur le site. La durée de vie d'une coquille Saint-Jacques pouvant excéder une dizaine d'années dans le milieu naturel, une augmentation temporaire de la biomasse locale est attendue [16].

La mesure de suivi (SU15) ciblant les effets directs et indirects des EMR sur le réseau trophique à travers l'exemple du projet éolien en mer du Calvados a d'ores et déjà été mise en œuvre aboutissant à l'élaboration d'une thèse (TROPHIK).

Les modèles mis en place dans cette étude mettent en évidence que la zone de restriction des pêches proposée dans l'étude d'impact (15% de la surface totale du parc) n'aurait pas un effet significatif sur la structure et le fonctionnement de l'écosystème [115]

En résumé :

Au sein de l'emprise des parcs éoliens en mer (et du tracé du câbles d'exportation), les restrictions d'usage appliquées pendant la phase d'exploitation sont susceptibles de créer un effet réserve généralement considéré comme positif pour les écosystèmes [14,35,127]. Les impacts indirects de l'exclusion d'autres activités humaines au sein des parcs éoliens offshores, peuvent être bénéfiques pour les ressources marines, à la fois autour des fondations des éoliennes et dans les zones environnantes à l'intérieur du parc éolien[154]. Sur les parcs éoliens Français, la pêche professionnelle sera autorisée (suivant les projets et les types de pratiques) ce qui limitera probablement l'effet réserve. Sur le parc éolien de Courseulles-sur-Mer, un effet positif est attendu autour des structures immergées et pour la population de coquilles St-Jacques.

3.4.2. QU'OBSERVE-T-ON SUR LES PARCS EOLIENS EN FONCTIONNEMENT ?

De manière générale, les résultats des suivis écologiques indiquent soit une augmentation de l'abondance de certaines espèces de poissons (par exemple, le tacaud, les lançons, la morue, le merlan, la sole) soit une situation équivalente par rapport aux conditions pré-construction. Cela suggère que l'effet réserve généré par les parcs éoliens offshores est relativement modéré (cf c3.3.3)[in 10,in 26,131].

Au Danemark, sur le parc de Horn Rev 1, une augmentation de l'abondance des petits poissons (merlans, limandes et lançons) a été mesurée 7 ans après la construction [39]. Cette croissance pourrait être attribuée au relâchement de la pression de pêche à l'intérieur du site [35]. Les études suggèrent que l'effet réserve est dépendant du mode de vie des poissons et de la taille de la zone d'implantation des parcs. Par exemple, la taille du parc éolien de Horn Rev I ne serait pas suffisante pour agir comme une aire marine protégée pour les espèces à large aire de dispersion larvaire comme le lançon nain (une emprise équivalente à un rectangle CIEM de la mer du Nord serait nécessaire pour avoir un impact positif pour cette espèce). Cependant, pour le lançon commun, qui fraie dans les zones côtières avec une dérive larvaire localisée et une période de frai qui coïncide avec l'activité de pêche, la présence du parc (et indirectement l'absence de captures par pêche) pourrait être bénéfique [38,132].

Au Royaume-Uni, sur le parc de Westermost rough, l'influence de l'arrêt temporaire de la pêche sur le homard a été caractérisée. Cette fermeture a entraîné une augmentation de l'abondance et de la taille des espèces cibles dans cette zone offrant un certain répit aux animaux adultes. L'augmentation temporaire du nombre de homards a eu un effet négatif sur les espèces commerciales accessoires dans la zone du parc (prédation/compétition). La réouverture du site à la pêche a entrainé une diminution des taux de capture et des tailles moyennes sans toutefois atteindre des niveaux inférieurs à ceux mesurés dans les zones témoins. Consécutivement, les tailles moyennes, abondances et production totale d'œufs du homard ont subi une diminution spectaculaire. Toutefois, six semaines après, les valeurs reflétaient celles de la zone témoin. L'auteur suggère que le parc éolien offshore Westermost Rough a eu, de manière générale, des impacts limités sur la structure en taille et les taux de capture des crustacés exploités commercialement et échantillonnés au cours des trois années de suivis [34,133].

En Belgique, Au cours des premières années après la construction les chercheurs Belges ont détecté des variations significatives et temporaires en termes de densités de poissons (entre les turbines) [13] accompagnées d'une augmentation des tailles moyennes de certaines espèces en bordure et au sein des parcs [41]. Ces conséquences ont été temporaires puisqu'après 9 ans de suivi, les résultats indiquaient que l'écosystème des sédiments meubles entre les turbines (à des distances > 200 m) n'a pas vraiment changé et que l'assemblage (richesse spécifique et densités) d'espèces au sein des parcs éoliens offshores semble être principalement structuré par les variabilités temporelles dont les mécanismes s'expriment à des échelles spatiales plus grandes (par exemple, les fluctuations de températures, les changements hydrodynamiques, les blooms planctoniques, l'oscillation Nord Atlantique etc.) [13].

Parc éolien en mer du Calvados : impacts anticipés de l'effet réserve sur la ressource halieutique

Cependant, l'augmentation légère mais significative des densités de poissons de certaines espèces de sédiments meubles (dragonnet commun *C. lyra*, petite vive *E. vipera*, solenette *B. luteum* et plie *P. platessa*) associée à une diminution de l'abondance dans la zone de référence semble être le premier signe d'un effet de réserve. Cette observation est probablement liée à une combinaison des effets de l'exclusion de la pêche et d'une disponibilité alimentaire plus importante (effet récif). Des effets plus prononcés ont été observés pour le parc éolien offshore C-power par rapport au parc de Belwind plus au large, soulignant que les effets pourraient être spécifiques au site et que l'extrapolation de ces résultats à d'autres parcs doit être effectuée avec précaution. [13].

En résumé :

Dans la plupart des parcs éoliens offshores, la pêche est interdite. Ces zones peuvent être considérées comme un refuge passif propice à la restauration des populations d'espèces marines à grande longévité entrainant potentiellement une augmentation des densités et des tailles individuelles. Néanmoins, en pratique, on n'observe uniquement des effets modérés pour le moment (Van Hoey et al. 2021). Par exemple, au sein des parcs éoliens Belges et Danois, les premiers signes d'un possible effet de refuge n'ont été signalés respectivement qu'après 9 ans et 7 ans.

Parc éolien en mer du Calvados : impacts anticipés de l'effet réserve sur la ressource halieutique

L'effet réserve anticipé dans la plupart des études d'impacts apparait comme modéré au regard des observations réalisées dans les parcs éoliens en fonctionnement au sein desquels la pêche est généralement interdite. Sur le parc éolien de Courseulles-sur-Mer, l'activité de pêche sera permise sur une partie du site ce qui conduit à penser que l'effet réserve sera probablement modeste. Les modélisations de l'évolution des réseaux trophiques dans le contexte de l'implantation du projet vont également dans ce sens.

La mesure « SU6 qui prévoit d'évaluer la fréquentation de la zone et l'impact du parc éolien sur les espèces avant et après la construction permettra, à l'instar des suivis menés sur les parcs Européens, de surveiller les évolutions de la structure des peuplements bentho-démersaux et notamment de détecter d'éventuelles manifestations d'un effet réserve.

3.5. EFFET DES CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES

3.5.1.GENERALITES

Qu'est-ce que l'effet champs électromagnétiques (CEM) ?

Naturellement présents partout dans les océans, les champs électromagnétiques naturels dominants sont :

- **Le champ géomagnétique terrestre** (25 à 65 µT)
- **Les champs électriques induits** par le mouvement de l'eau de mer se déplaçant à travers le champ géomagnétique [134,135].

Les câbles sous-marins utilisés pour le transfert d'énergie (et dans une moindre mesure pour la télécommunication) sont des sources connues de CEM. [136] Des câbles électriques sous-marins sont installés partout dans le monde depuis le milieu du XXème siècle, mais leur nombre s'est accru ces dernières décennies pour raccorder des îles aux continents, pour alimenter des plateformes en mer ou des observatoires sous-marins, mais surtout pour transporter l'énergie produite par les dispositifs d'exploitation des énergies marines renouvelables (EMR). En 2015, 8000 km de câbles de grande puissance (en HVCD) étaient posés sur les fonds marins, dont 70% dans les eaux européennes [in 15]

Des champs électromagnétiques sont créés par le flux de courant traversant ces câbles et peuvent être divisés **en champs électriques** (appelés champs E, mesurés en volts par mètre, Vm-1) et **champs magnétiques** (appelés champs B, mesurés en Tesla). **Les champs électriques** augmentent en intensité à mesure que la tension augmente et peuvent atteindre 1000 µVm-1 pour un câble électrique [137]. Différentes méthodes existent pour isoler les câbles électriques afin de contenir les champs électriques émis [14]. Ces derniers sont généralement efficacement confinés à l'intérieur des câbles par blindage. Les câbles sous-marins peuvent transporter des courants électriques avec des intensités de 1600 A. En réponse, **des champs magnétiques** d'environ 3200 µT se produisent, diminuant à 320 µT à 1m de distance, 110 µT à 4m et jusqu'à des valeurs similaires au champ magnétique terrestre (50 µT) au-delà de 6m [in 14,138].

La figure suivante (Figure 30) décrit ce principe pour un câble HDVC (High Voltage Direct Current / courant continu haute tension). Le courant électrique passe dans le câble conducteur et produit un champ électrique retenu par le blindage du câble. Le champ magnétique produit est, quant à lui, émis dans le milieu environnant.

Le passage des organismes à travers ce champs magnétique crée également un champ électrique induit. [134].

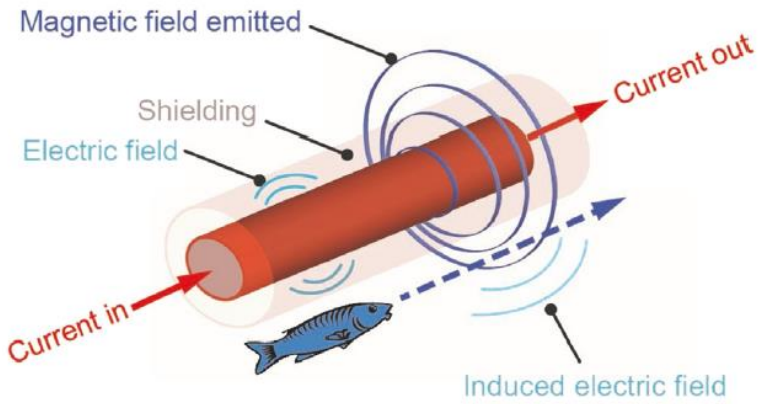


Figure 30: Représentation simple d'un câble HVDC sous-marin et des champs électromagnétiques émis [134,adapté de 139]

Parc éolien en mer du Calvados :

Quels sont les impacts potentiels des CEM sur l'ichtyofaune et les populations associées ?

Une grande partie des connaissances actuelles est basée sur la théorie ou sur des expériences en milieu contrôlé. La sélection des paramètres clés (intensité des CEM, distances d'exposition) reste toutefois difficile[135,140–142] et les impacts sont le plus souvent évalués à l'échelle individuelle (en condition de laboratoire)[15]. La plupart des recherches associées se concentrent sur la réponse comportementale à l'exposition aux CEM [10]

Plusieurs études ont examiné le comportement des espèces au voisinage immédiat de plusieurs câbles électriques sous-marins (courant continu et courant alternatif) en fonctionnement [15]. Cependant les connaissances disponibles concernant les capacités sensorielles et les réponses pour de nombreuses espèces aux niveaux d'exposition aux CEM nécessitent encore d'être approfondies. En effet, les données sur les seuils de sensibilité ou de tolérance ne sont disponibles que pour un petit nombre de taxons [1415]. Les études sur le terrain sont intéressantes car elles permettent d'évaluer directement les impacts des champs électromagnétiques et les réponses directes liées à l'écologie des organismes marins. La taille de l'effet et la contribution des autres effets (effet récif, forçage environnemental), restent difficiles à distinguer [14,142,143].

Les espèces bentho-démersales ou vivant dans les petits fonds sont les plus exposées. Les espèces pélagiques nagent généralement au-dessus du fond marin et ne seront, à priori, que rarement exposées aux CEM. Les effets comportementaux résultant des champs électromagnétiques, chimiques ou des signaux acoustiques, ou une combinaison de tels facteurs de stress pourraient cependant avoir un impact sur les mouvements modèles de ces espèces [1]

De nombreuses espèces de poissons et de crustacés peuvent détecter les CEM. Les câbles électriques sous-marins peuvent interagir de manière négative avec les espèces marines sensibles, notamment les organismes benthiques et démersaux à travers [14,144]:

- Des impacts sur les interactions prédateur/proie.
- Des impacts sur le développement ou des impacts physiologiques (perturbation du développement embryonnaire et cellulaire par exemple).
- Des impacts sur les capacités de navigation/orientation des espèces.
- Des impacts comportementaux évitement/attraction et autres.

Les organismes marins qui réagissent aux champs électromagnétiques sont généralement classés en deux groupes [139]:

- **Les espèces magnéto-sensibles :** Certains élasmobranches utilisent le champ magnétique pour s'orienter [145]. D'autres espèces comme le saumon et l'anguille américaine et leurs stades larvaires ont fait preuve d'une sensibilité magnétique [135]. Quelques espèces pélagiques (requins pélagiques, anguilles, le saumon de l'Atlantique) sont également magnéto-sensibles.

- **Les espèces électro-sensibles** : Des études ont montré que les poissons les plus susceptibles de réagir aux champs électriques possèdent des capacités électrosensibles et/ou des ampoules de Lorenzini. Les ampoules sont les organes d'électro-détection des requins, raies, esturgeons et polyodons. Ces espèces les utilisent pour localiser proies (nourriture), partenaires et prédateurs [135]. Les poissons osseux (téléostéens) sont également connus pour détecter les CEM et les champs électriques pour l'orientation et les longues migrations (les espèces de poissons amphihalins par exemple) [144].

Chez les poissons, les requins et les raies (élasmobranches) sont considérés comme particulièrement sensibles aux CEM (DHV, 2020). Ils peuvent être attirés par des champs anthropiques plus faibles ou repoussés par des champs plus forts (English et al. 2017) empêchant certains mouvements entre les zones importantes (telles que les zones d'alimentation, d'accouplement et de nurserie [14]. Dans le cadre du projet COWRIE (Collaborative Offshore Wind energy Research Into the Environment), les chercheurs ont rapporté que les élasmobranches sont attirés par des champs électriques générés par le courant continu entre 0,005 et 1 µV cm-1, et repoussés par des champs électriques d'environ 10 µV cm-1 et plus [146]. Les effets des champs électromagnétiques peuvent inclure la perturbation ou le masquage de l'électro-réception. En réponse à une exposition aux CEM, des changements de comportement des espèces qui migrent à l'aide de repères magnétiques, et celles qui s'orientent et/ou fourragent à l'aide de l'électricité et/ou les champs magnétiques des câbles sous-marins ont été observés (Hutchison et al., 2020 in gill 2020)

Parc éolien en mer du Calvados :

Les mollusques ont tendance à réagir à un champ magnétique modifié en changeant leur schéma d'activité. Cependant, pour induire ce changement de comportement, l'intensité du champ magnétique doit augmenter de manière substantielle [144]. Chez les moules *Mytilus edulis*, une exposition aux CEM (3700 µT) prolongée (3 mois) n'a pas entrainé de conséquence sur la survie des individus ou leur capacité reproductive. Une diminution de l'hydratation et des valeurs d'azote aminé est constatée pour cette espèce pour des valeurs >5000 µT.

Les crustacés semblent répondre différemment aux expositions aux CEM en fonctions des espèces et des stades de développement. Des modifications hormonales ont, par exemple, été identifiées chez le tourteau ainsi que des changements de comportements (attraction). [147]. Exposés à des CEM en laboratoire, les homards juvéniles semblent ne semblent pas être affectés (Taormina et al. 2020).

Plusieurs recommandations sont proposées par la communauté scientifique pour combler les manques de connaissance :

- Démontrer si les études menées en laboratoire sont représentatives (en termes de caractéristiques, géométries et plages d'intensité des CEM, interactions avec l'environnement) des CEM en milieu marin [142].
- Effectuer des mesures des CEM continues et sur le long terme dans des conditions de vent variables jusqu'à la production d'énergie maximale [144].
- Approfondir la problématique de l'évaluation des impacts cumulés [15].
- Anticiper les impacts environnementaux potentiels des câbles et appliquer les mesures d'évitement et de réduction [14].
- Les espèces benthiques sont soupçonnées d'être plus exposées que les espèces pélagiques, mais des travaux sont nécessaires pour le caractériser. Les impacts sur les stades de la vie (le développement des œufs de poisson peut être influencé par les changements de température induits par les câbles par exemple) nécessite une attention particulière [148]

En résumé :

Le passage du courant électrique dans les câbles électriques sous-marins génère dans l'environnement marin des champs électromagnétiques (CEM) caractérisés par un champ magnétique et un champ électrique induit. Les champs-électromagnétiques peuvent potentiellement affecter les espèces électro et magnéto-sensibles (à l'exemple des élasmobranches ou des espèces migratrices). Les espèces benthiques et démersales sont potentiellement les plus vulnérables. Les impacts possibles sont caractérisés par des perturbations des interactions prédateur/proie, des impacts physiologiques ou sur le développement, des perturbations de l'orientation/migration des espèces, des modifications de comportements telles que l'attraction ou l'évitement.

Les connaissances disponibles concernant les capacités sensorielles et les réponses pour de nombreuses espèces aux niveaux d'exposition aux CEM nécessitent d'être approfondies [14,15].

Parc éolien en mer du Calvados :

3.5.2. L'EFFET CEM DANS LE CONTEXTE DES PARCS EOLIENS OFFSHORES

Les CEM créés par les Parcs Eoliens offshores :

Pour les projets d'énergie éolienne en mer, les principales sources de champs électromagnétiques sont liées au transport de l'énergie produite. Les parcs éoliens offshores sont en effet constitués de câbles d'alimentation inter-éoliennes utilisés pour connecter les turbines entre elles et les sous-stations en mer (câbles d'environ 15 cm de diamètre pour une puissance entre 34,5- ou 66 kV et disposés en grappes). Un ou plusieurs câbles d'exportation transportent ensuite l'énergie générée vers les installations à terre (câbles entre 20 et 30 cm de diamètre pour une puissance entre 138- ou 230 kV). Ces câbles transmettent un courant alternatif de fréquence 50/60 Hz (hertz) [10,149] La Figure 31 illustre ce principe.

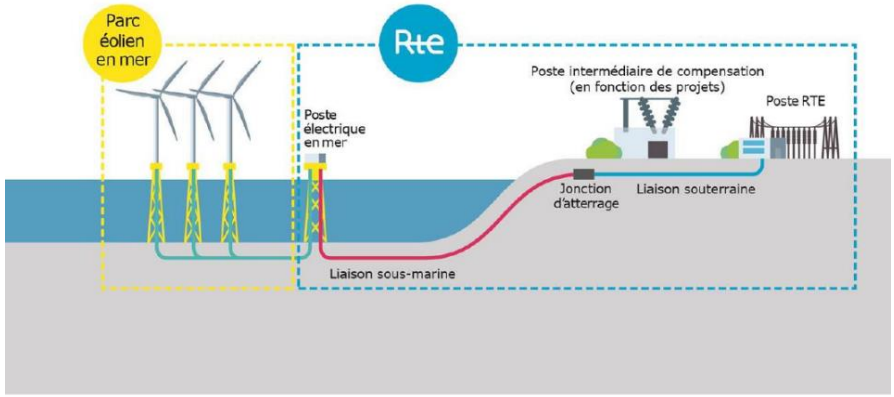


Figure 31: Schéma de raccordement d'un parc éolien posé (Source RTE)

Différentes méthodes existent pour isoler les câbles électriques afin de contenir les champs électriques émis. Des conceptions spécifiques ont été étudiées pour les câbles dynamiques, avec des couches de blindage et des composants internes spécifiques. Le champ magnétique, en revanche, moins protégé par ce revêtement métallique est perceptible autour des câbles. Le champ magnétique induit un faible champ électrique dans l'océan environnant lié à la quantité de courant qui traverse le câble[14]. Les valeurs modélisées ou mesurées sur plusieurs parcs éoliens (avec des distances aux câbles variables entre 0 et 11 mètres) montrent des valeurs de champs magnétiques comprises entre 0 et 13 µT inférieures aux valeurs du champ géomagnétique terrestre (25 à 65 µT).

Etude	Tension (kV)	Intensité (A)	Distance radiale au câble (m)	Champ magnétique (µT)	Champ électrique induit (µV/m)
Modélisation d'AEI Cables Ltd (CMACS, 2003)	33	641	0	1,7	-
			2,5	0,61	-
Projet de démonstration Béatrice (Talisman Energy Limited, 2006)	33	175	0,9	0,8	45
			20	0	0
Parc de Deepwater Block Island (US) (BPA[1] 2012)	34,5	537	2,8	2,2	-
			4,1	0,6	-
			≥ 10,4	0,05	-
Parc éolien du Moray Firth (Moray offshore renewables, 2012)	33	715	1	13	-
			6	0,5	-
			11	0,15	-

Figure 32: Mesures du champ magnétique et du champs électrique induit sur plusieurs parcs éoliens [16]

[1] BPA : *Bonneville Power Administration*, agence de l'US Department of Energy

Parc éolien en mer du Calvados : l'effet champs électromagnétiques généré par le projet

Au sein du parc éolien en mer du Calvados, les éoliennes seront raccordées par plusieurs grappes de câbles au poste électrique. Chaque grappe comprendra 4 à 7 éoliennes, compte tenu de la capacité maximale des câbles et de la tension de sortie de la turbine (33 kV). Deux sections différentes seront utilisées pour les âmes des conducteurs, à savoir 240 mm² d'une part et 630 mm² d'autre part, ce qui correspond à un diamètre extérieur du câble compris entre environ 11 cm et 15 cm et à un poids d'environ 20 à 40 kg par mètre. L'intensité maximale du courant électrique transitant dans le dernier tronçon de câble de la grappe est de l'ordre de 820 A.

Chaque câble est constitué de trois conducteurs positionnés en « trèfle », dans lesquels transitent des courants électriques déphasés de 120° les uns par rapport aux autres. Chaque conducteur est composé d'une âme en aluminium ou en cuivre, gainée par un matériau hautement isolant permettant une utilisation jusqu'à un niveau de tension de 36 kV.

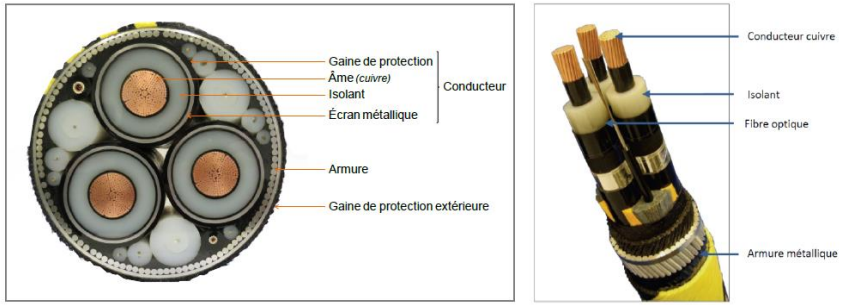


Figure 33: Câble électrique sous-marin inter-éolien (à gauche en coupe, NSW ; à droite Draka)

Les câbles seront ensouillés dans le sédiment ou protégés par un cordon en enrochements, en fonction des caractéristiques du sol. La configuration en trèfle des trois conducteurs des câbles permettra également de limiter l'intensité du champ magnétique résultant. La typologie des câbles électriques utilisés pour le parc éolien en mer de Courseulles-sur-Mer est similaire à celle des câbles ayant fait l'objet des études précédentes (Figure 32).

Les champs magnétiques présenteront des intensités de l'ordre **de 1 à la dizaine de µT à 0,5-3 m du câble**. D'après la bibliographie, les champs électriques induits devraient être de l'ordre de quelques **µV/m à plusieurs dizaines de µV/m, à 1 m du câble**. Ces deux types de champs sont alternatifs, **émis à la fréquence de 50 Hz** [16]

Quels sont les impacts anticipés dans le contexte des parcs éoliens en mer ?

En phase d'exploitation, les espèces peuvent interagir avec les CEM générés par l'électricité transmise dans les câbles sous-marins et le câble d'exportation vers le continent (Taormina et al. 2018 ; Hutchison et al. 2020). De manière générale, sur la base de l'analyse bibliographique, l'impact des CEM est jugé globalement moyen pour les poissons migrateurs et les élasmobranches, dans le cas des câbles posés et dynamiques (avec des niveaux d'incertitudes respectivement moyen et fort), et faible dans tous les autres cas (avec un niveau d'incertitude moyen)[15]. Comme les champs électromagnétiques des câbles sous-marins diminuent rapidement avec la distance du câble, l'enfouissement des câbles réduit considérablement les niveaux de champs magnétiques et électriques induits dans l'eau de mer [149].

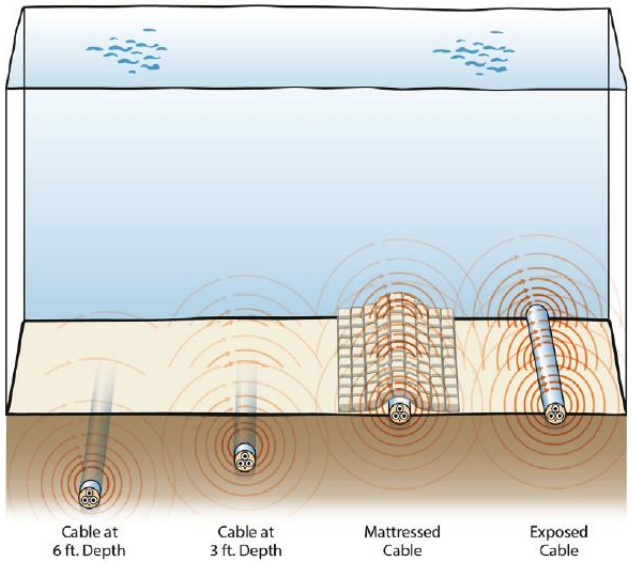


Figure 34: Illustration des différentes configurations de câbles[149]

Dans le contexte des parcs éoliens en mer, Wilhelmsson [67] estimait en 2010 que l'on pouvait s'attendre à des impacts moyens, Bergström [9] en 2014, prévoyait des impacts faibles à moyens. Les impacts anticipés de l'effet CEM à l'échelle des parcs éoliens ont été estimés permanents, d'influence locale, entre négligeables et moyens suivant les études d'impacts considérées (Figure 35).

Effet des Champs electro-magnétiques		
Phase		Exploitation
Source		Transport de l'électricité
Niveau de certitude des prédictions/estimations(1 faible à 5 élevé)		2
Échelle estimée de l'impact n.d. = Non évalué	spatiale	locale
	temporelle	long-terme
	type d'impact (English,2017)	attraction/évitement
Degré estimé d'incidence (-) ou de bénéfice (+) des impacts pour les assemblages d'espèces dans la zone du parc éolien	Dan Wilhelmsson et al. 2010	(-) moyen
	Bergström et al. 2014	(-) faible à (-) Moyen
	North Sea Power WindPark (Belgique)	(-) Négligeable
	Morray West Wind Farm EIA (Eco)	(-)négligeable à faible
	Rampion Wind Farm EIA (En)	(-) moyen
	Hornsea 3 Wind Farm EIA (En)	(-)faible
	Hornrev 2 Wind Farm EIA (Dan)	(-)faible
	Gunfleet Sands 2 Wind Farm EIA (En)	(-)faible
	Greater gabbard Wind Farm EIA (E (En)	(-) négligeable à (-) Moyen
	Sheringham Shoal Wind Farm EIA (En)	(-) négligeable à faible
	Parc éolien de St-Nazaire EI (Fr)	(-) Négligeable
	Parc éolien de Dieppe - le Tréport EI (Fr)	(-) négligeable à faible
	Parc éolien de Yeu-Noirmoutier EI (fr)	(-) négligeable à faible
	Parc éolien de Fécampr EI (fr)	(-) faible

Figure 35: Estimation des impacts de l'effet CEM sur la ressource halieutique dans plusieurs parcs éoliens offshores [9,67,82,83,74–81]

Parc éolien en mer du Calvados : impacts anticipés de l'effet champs électromagnétiques sur la ressource halieutique

Les champs magnétiques et électriques induits générés par les câbles, s'ils sont détectés, ne sont susceptibles d'être perçus qu'à quelques mètres autour du câble. L'ensouillage des câbles dans le sédiment permet de sortir de l'aire d'influence maximale et d'imposer une distance minimale d'éloignement, réduisant les effets potentiels [16]. L'étude d'impact du projet indique pour les :

- **Espèces bentho-démersales :** des élasmobranches ont été recensés lors des campagnes d'évaluation de la ressource halieutique. Au niveau des requins, la petite roussette et l'émissole tachetée sont présentes au printemps et en été de manière commune ou constante, alors que la grande roussette est présente au printemps, mais accidentellement lors de la campagne. Un seuil de détection de 1-95 µV/m a été rapporté pour la petite roussette[150]. Cette espèce pourrait donc potentiellement percevoir un champ électrique émis de 50 µV/m jusqu'à environ 7 m du câble. Au niveau des raies, la raie bouclée (considéré comme menacé et/ou en déclin par OSPAR) est présente lors des deux campagnes occasionnellement, alors que la raie lisse est considérée accidentelle lors de la campagne de printemps. Pour la raie bouclée, le BOEMRE rapporte un seuil de détection de 1-10 µV/m [150]. De la même façon, cette espèce pourrait donc percevoir un champ électrique émis de 50 µV/m jusqu'à environ 7 m du câble. Le groupe des poissons osseux, ou téléostéens, ne possède pas un organe sensoriel détectant les champs électriques, en l'état actuel des connaissances leur sensibilité n'est pas avérée. Ce groupe concerne pour les espèces benthiques : plie, limande, turbot, dorade grise, sole, grondin… Parmi celles qui ont été recensées lors des quatre campagnes, plusieurs ont été retrouvées de manière constante (Plie d'Europe, Turbot, Sole commune, Dorade grise).
- **Espèces amphihalines :** Au regard des intensités des champs magnétiques émis par les câbles du parc, les poissons seront éventuellement perturbés jusqu'à quelques mètres de part et d'autre du câble. En ce qui concerne les champs électriques induits, des seuils de détection de 60 mV/m et de 10-2000 µV/m sont donnés respectivement pour le saumon atlantique et la lamproie fluviatile [150]. Ainsi, la lamproie serait susceptible de détecter un champ électrique de 50 µV/m jusqu'à environ 2 m du câble. Le saumon ne détectera a priori pas les champs électriques induits par les câbles inter-éoliennes.

Les impacts des champs électromagnétiques ont été évalués comme négatifs, directs, permanent et négligeables sur la ressource halieutique.

EFFET CEM					
Phase	Compartiment	Evaluation des impacts			
		Positif/négatif	Direct/indirect	Durée	Intensité
construction	Espèces de poissons pélagiques	négatif	direct	permanent	négligeable
	Espèces de poissons benthiques	négatif	direct	permanent	négligeable
	Espèces amphihalines	négatif	direct	permanent	négligeable
	Larves	négatif	direct	permanent	négligeable
	invertébrés	négatif	direct	permanent	négligeable

Figure 36 : Evaluation des impacts de l'effet des champs électro-magnétiques sur la ressource halieutique dans le cadre du projet éolien offshore de Courseulles-sur-Mer

En résumé :

Les parcs éoliens en mer utilisent un réseau de câbles électriques sous-marins pour transporter l'énergie produite vers la côte. Le passage du courant électrique dans les câbles génère dans l'environnement marin des champs électromagnétiques (CEM). Les valeurs modélisées ou mesurées sur plusieurs parcs éoliens (avec des distances aux câbles variables entre 0 et 11 mètres) montrent des valeurs de champs magnétiques comprises entre 0 et 13 µT. Cet effet intervient pendant toute la phase opérationnelle des projets de parcs éoliens offshores et est limité par l'ensouillage des câbles. Les impacts anticipés de l'effet CEM à l'échelle des parcs éoliens ont été estimés permanents, d'influence locale, entre négligeables et moyens suivant les études d'impacts considérées.

3.5.3. QU'OBSERVE-T-ON SUR LES PARCS EOLIENS EN FONCTIONNEMENT ?

Au Danemark, sur le câble d'exportation de 132 kV du parc de Nysted (câble ensouillé à 1 mètre), des études sur la migration/le mouvement des poissons ont été conduites post-construction entre 2003 et 2004. Les données indiquent des impacts significatifs des champs électromagnétiques sur quatre espèces : le hareng de la Baltique, l'anguille Européenne, le cabillaud et la plie. Les auteurs rapportent que la migration de certaines espèces à travers le tracé du câble a pu être perturbée. Les résultats suggèrent également que la migration n'a pas été complètement bloquée [105].

Le programme de surveillance du parc Horns Rev 1 a identifié certains impacts sur les schémas de migration de la blennie Vivipare (*Zoarces viviparus*), du cabillaud (*Gadus morhua*) et du flet (*Platichthys flesus*) [in 29,105]. Il a été suggéré que la conception du suivi pour cette étude ne permettait pas de lier fermement ces observations aux CEM (sous-échantillonnage des élasmobranches) [in 29,67,105].

Au Royaume-Uni, en 2014, le MMO (organisme public exécutif non ministériel, parrainé par le ministère de l'Environnement, de l'Alimentation et des Affaires rurales du Royaume-Uni) indiquait que d'après les résultats de la surveillance post-construction menée à ce jour sur les parcs éoliens du Royaume-Uni, aucune preuve ne suggérerait que les CEM représentent une menace importante pour les élasmobranches présents sur les sites offshores. Le MMO précisait cependant que les études expérimentales n'avaient pas été en mesure de confirmer la capacité des poissons à détecter les CEM, ni les niveaux à partir desquels ces derniers deviennent attractifs ou répulsifs. Le MMO indiquait, en outre, qu'il existe une faible probabilité que les parcs éoliens repoussent les élasmobranches au-delà de quelques mètres du câble, s'il est enterré à une profondeur suffisante. La possibilité d'impacts plus subtils (attraction des élasmobranches, curiosité et réponse alimentaire) n'était cependant pas écartée. [151].

Parmi ces suivis-post-construction ciblant les élasmobranches, celui mené sur le parc de Gunfleet Sands, a rapporté l'existence de changements mineurs pour la raie bouclée (*Raja Clavata*, considérée comme potentiellement affectée par les champs électromagnétiques dans l'étude d'impact) dans la mesure où elle représentait l'espèce la plus abondante capturée après la construction (au sein du parc dans un premier temps, puis dans tout le secteur par la suite). La possibilité que la raie bouclée ait pu être attirée dans la zone par les champs électromagnétiques anthropiques n'est toutefois pas abordée par les auteurs [in 10].

Sur le parc de North Hoyle, aucun requin ni aucune raie n'ont été capturées au sein du parc pendant le programme de surveillance effectué depuis 2003 (état initial et suivi post-construction). Des espèces d'élasmobranches ont été cependant été détectées à proximité du site. L'hypothèse d'un sous-échantillonnage de ces espèces en raison d'un engin inadapté à leur capture est indiquée dans le bilan qui conclue que les données récoltées sont insuffisantes pour confirmer ou réfuter l'absence d'impact [124].

Sur le parc de Burbo Bank, le suivi post-construction a examiné les effets des CEM sur l'alimentation des espèces communes d'élasmobranches. Les estomacs des poissons capturés sur le secteur du câble en fonctionnement (et donc soumis aux CEM) se sont révélés pleins suggérant l'absence d'impacts délétères sur leur alimentation. Toutefois, les auteurs indiquent que l'effet récif du câble a probablement entrainé une augmentation de la nourriture disponible. [151]

Parc éolien en mer du Calvados : impacts anticipés de l'effet champs électromagnétiques sur la ressource halieutique

.

La présence de raies bouclées et d'autres élasmobranches (comme l'émissole lisse) a également été documentée par le programme de surveillance du parc de Kentish Flats. Les captures par unité d'effort (CPUE) de la raie bouclée ont augmenté au fil des années, pendant les mois d'été, au sein du parc et des zones de référence. Il a été conclu qu'il était peu probable que l'augmentation observée soit due à l'exploitation du parc éolien de Kentish Flats [in 10].

Sur le parc de Thanet, l'étude de surveillance des élasmobranches a identifié quatre espèces d'élasmobranches : la raie bouclée (*Raja clavata*), l'aiguillat commun (*Scyliorhinus stellaris*), l'émissole tâchetée (*Mustelus asterias*) et le requin hâ (*Galeorhinus galeus*). L'espèce prédominante dans les échantillons était l'émissole tachetée (entre 43 % et 100 % des individus capturés). Parmi toutes les espèces capturées, une proportion significativement plus élevée de femelles a été capturée [124].

Sur le parc de Sheringham Shoal, les études ciblant les élasmobranches ont indiqué que des impacts subtils tels que l'attraction, la curiosité et des modifications de comportements alimentaires étaient probables mais qu'aucun impact sur les populations n'avait été enregistré.

Sur le parc de Barrow, cinq espèces d'élasmobranches ont été identifiées sur toute la durée du suivi halieutique. L'aiguillat commun et la raie bouclée étaient majoritaires en termes d'effectifs. De manière générale, le nombre d'espèces d'élasmobranches avait augmenté un an après la construction du parc sauf pour les deux espèces les plus communes pour lesquelles une légère baisse a été mesurée [124].

Des études en mésocosme (projet COWRIE) ciblant les impacts des champs électromagnétiques émis par les câbles sous-marins sur plusieurs espèces d'élasmobranches ont montré que la réponse n'était pas prévisible et semblait être spécifique à l'espèce, peut-être même spécifique aux individus [in 14,139,146].

En Ecosse, sur le parc éolien offshore de Robin Rigg, les suivis réalisés ont détecté une augmentation des densités d'élasmobranches le long du tracé du câble suggérant un effet d'attraction. Cependant, les investigations sur les sites témoins ont montré une augmentation comparable [152].

En Suède, en phase opérationnelle, une étude ancienne sur les poissons migrateurs (suivi télémétrique par Westerberg, 1994,2000) n'a pas montré d'effet significatif du parc Svante (situé au large de la côte sud-est de la Suède) sur la direction des migration des anguilles [in 54] du moins pas au-delà de 500 m des éoliennes. Au sein du parc, l'analyse de taux de captures montrait que la présence de l'anguille dépendait de l'activité des éoliennes (en marche ou arrêtées), mais il n'avait pas pu être déterminé clairement si cet impact était lié au bruit ou à l'électromagnétisme [15].

En résumé :

Les programmes de surveillance des parcs éoliens offshores qui ont examiné les impacts des CEM se sont principalement intéressés aux changements de comportement des poissons (principalement les élasmobranches). Des phénomènes d'attraction ou de changement de schémas de migration ont été suggérés par certains auteurs, d'autres ont conclu à une absence d'impact significatif (abondances, comportements et alimentation).

Parc éolien en mer du Calvados : impacts anticipés de l'effet champs électromagnétiques sur la ressource halieutique

Les retours d'expérience des parcs en fonctionnement sont assez peu nombreux. Les observations conduites sur les parcs en fonctionnement présentent des résultats parfois contradictoires (effet d'attraction/répulsion/absence d'impacts significatifs).

Le projet de parc éolien de Courseulles-sur-Mer anticipe les impacts liés aux CEM comme négligeables considérant :

- ✓ Les niveaux de champs relativement faibles générés par les câbles électriques
- ✓ La diminution rapide des champs électromagnétiques avec la distance du câble
- ✓ La réduction des niveaux de champs magnétiques et électriques induits dans l'eau de mer en raison de l'enfouissement des câbles.

Plusieurs programmes de surveillance seront menés en parallèle et permettront de détecter et quantifier les impacts du projet incluant ceux imputables aux CEM.

- ✓ **La mesure « SU6** prévoit d'évaluer la fréquentation de la zone et l'impact du parc éolien sur les espèces avant et après la construction et permettra, à l'instar des suivis menés sur les parcs Européens, de surveiller les évolutions de la structure des peuplements bentho-démersaux.

- ✓ **Le Suivi de la Coquille Saint Jacques** [90]: prévoit suivi pluriannuel pendant les différentes phases du projet (2022,2023,2024,2025 puis en phase d'exploitation). Ce suivi intègre la mise en place (2025) d'une cage au centre du parc permettant de mesurer les impacts des champs électromagnétiques sur les coquilles Saint-Jacques. Ce suivi est une extension du projet OASICE (cOquille Saint-JAcques, outil de Surveillance de l'Impact des Câbles Electriques), mené par le CNRS et TBM qui vise à évaluer l'incidence des CEM du câble IFA2 et des câbles de raccordement du parc éolien (maitrise d'ouvrage de RTE).

- ✓ **FISHOWF**[91] **:** ce projet collectif (intégrant le projet de Courseulles-sur-Mer comme site pilote) regroupe 14 partenaires et a pour objectif de développer une surveillance à long terme des communautés de poissons capable de détecter les effets des parcs éoliens offshores. Centré sur les élasmobranches (raie brunette *Raja undulata*, raie bouclée *Raja clavata*, émissole tacheté *Mustelus asterias*, *aiguillat* commun *Squalus acanthias*, requin taupe *Lamna nasus*) le programme prévoit le déploiement de dispositifs de télémétrie acoustique multilatérale pour examiner les mouvements des poissons électrosensibles autour des câbles afin de détecter de potentiels impacts des champs électromagnétiques.

3.6. CONCLUSIONS

La thématique des effets et impacts des parcs éoliens offshore sur l'ichtyofaune, aussi vaste et complexe soit-elle, a fait l'objet d'un travail de recherche approfondi par la communauté scientifique. Les publications de recherches appliquées permettent d'appréhender les effets (nature, intensité, durée) des projets éoliens en mer et leurs impacts potentiels sur les poissons, mollusques et crustacés. Les suivis et programmes de surveillance environnementaux à long termes apportent des connaissances concrètes, mesurées sur le terrain, et un retour d'expérience nécessaire à l'évaluation des impacts réels des projets éoliens offshores.

Indéniablement, les fermes éoliennes marines changent l'environnement local[6]. En phase de construction, des impacts négatifs sur les populations halieutiques (diminution des abondances au sein des périmètres des parcs) ont été mis en évidence, probablement en raison des bruits intenses générés par le battage de pieux ou, dans une moindre mesure, de l'effet turbide. L'effet acoustique est fort et ses conséquences directes sur la ressource halieutique sont significatives. On constate cependant, avec le recul, que cette situation est généralement temporaire.

Les suivis post-construction attestent, en effet, d'un retour rapide à des structures de peuplements équivalentes ou supérieures aux secteurs environnants (en termes de diversité et d'abondances), tendance se confirmant sur le long terme. Si ce constat semble positif (résilience des populations de poissons, crustacés et mollusques), il permet toutefois de supposer une ampleur limitée de l'effet réserve (et ses bénéfices pour la ressource halieutiques pour les zones adjacentes, ou effet « spill-over ») anticipé dans les études environnementales.

Parallèlement, les conséquences d'un effet récif artificiel ont été documentées sur la plupart des parcs éoliens en fonctionnement et témoignent d'une forte une colonisation/attraction des fondations des turbines par la faune benthique, les grands crustacés et les poissons de substrats durs. En conséquence, la diversité des espèces inféodées aux milieux rocheux et les abondances montrent des augmentations importantes localement qui se maintiennent vraisemblablement dans le temps.

Les conséquences des impacts des champs électro-magnétiques des câbles et du bruit généré par les turbines en fonctionnement sont moins évidentes au regard des résultats parfois contradictoires (effet d'attraction/répulsion/absence d'impact significatif) des quelques suivis réalisés in-situ d'une part et de la difficulté à transposer les études opérées en milieu contrôlé à la réalité.

La communauté scientifique s'accorde sur le fait que des inconnues subsistent (impacts réels des champs électro-magnétiques, impacts du bruit sur les invertébrés ou le développement des poissons, impacts cumulés, transposition des résultats aux autres parcs éoliens) d'une part et qu'il est nécessaire d'orienter, dans l'avenir, la recherche pour caractériser les impacts des parcs éoliens offshores à plus large échelle.

Parc éolien en mer du Calvados : conclusions

Les effets et impacts du projet éolien au large de Courseulles-sur-Mer sur la ressource halieutique ont été évalués dans une étude d'impact environnementale et sont comparables (en termes de nature intensité et durée) à ceux anticipés pour les autres projets Européens. L'effort de recherche mis en œuvre au niveau européen (et notamment les programmes de surveillances des parcs éoliens en fonctionnement) permet aujourd'hui de bénéficier de retours d'expériences sur le long terme à mettre en perspective avec le projet au large de la baie de Seine :

- ✓ **Les impacts du bruit** liés à la construction du parc de Courseulles-sur-Mer sur les populations halieutiques ont été estimés négligeables (invertébrés) à moyens (poissons et larves). En phase d'exploitation, ils ont été jugés nuls/négligeables (espèces amphihalines, larves) à faibles pour les autres composantes. Une diminution temporaire de la fréquentation de la zone des travaux par les espèces pélagiques et bentho-démersales est attendue. Considérant les observations réalisées en Europe, un retour rapide à la situation pré-travaux peut être anticipé. A noter que le projet Normand privilégie une solution moins impactante en termes de bruit avec l'utilisation d'une méthode mixte de vibrofonçage et de forage (la plupart des parcs éoliens actuellement en fonctionnement ont mis en œuvre des techniques de battages de pieux).

- ✓ **Les impacts de l'augmentation de la turbidité** en phase de construction sur les populations halieutiques ont été jugées négligeables à faibles, à l'instar des autres parcs éoliens et en comparaison d'autres activités anthropiques marines (dragage, exploitation de granulats marin, pêche etc). Les suivis opérés sur les sites opérationnels n'ont pas détecté d'impacts significatifs sur la ressource halieutique liés à la turbidité. A noter que peu d'étude ont ciblé cette problématique.

- ✓ **Un effet récif** sur les structures immergées du parc éolien offshore du Calvados est anticipé en phase d'exploitation avec en conséquence un développement de biocénoses benthiques. Indirectement, un impact permanent (attractions/développement des espèces pélagiques autour des fondations, des espèces benthiques au niveaux des protections de câbles et anti-affouillements) est anticipé sur les populations halieutiques. Les résultats issus de modèles de réseaux trophiques développés avec l'exemple du projet de Courseulles-sur-Mer vont également dans ce sens. La plupart des suivis à court et long-termes menés en Europe ont observé cet effet aboutissant au développement d'une communauté de poissons et grands crustacés dont la diversité et les abondances peuvent s'avérer importantes et parfois supérieures aux fonds durs environnant.

- ✓ Compte tenu de la possibilité envisagée de pratiquer la pêche au sein du territoire du parc, **l'effet réserve** sera probablement limité en phase d'exploitation. Cette prévision est consolidée par les résultats des modèles de réseaux trophiques. En pratique, on observe uniquement des effets modérés pour le moment sur les parcs éoliens en fonctionnement.

- ✓ **Les impacts liés aux champs électro-magnétiques** ont été évalués comme négligeables considérant les niveaux de champs anticipés comme relativement faibles (notamment en raison de l'ensouillage des câbles) et diminuant rapidement avec la distance. Les observations conduites sur les parcs en fonctionnement présentent des résultats parfois contradictoires (effet d'attraction/répulsion/absence d'impacts significatifs).

Parc éolien en mer du Calvados : conclusions

Suivant l'exemple des projets Européens, le projet Normand inclut la mise en œuvre de mesures de suivi basées sur le protocole Before-After-Control-Impact (BACI) afin de de contrôler l'efficacité des mesures ERC d'une part et de permettre l'amélioration des connaissances d'autre part. Plusieurs programmes de surveillance seront menés en parallèle et permettront de détecter et quantifier les impacts du projet sur l'ichtyofaune et les populations associées :

- ✓ **Mesure « SU6 :** Améliorer la connaissance de la fréquentation de la zone par l'ichtyofaune, et ses éventuelles modifications de comportements » : ce suivi prévoit de mesurer précisément la fréquentation de la zone et l'impact du parc éolien sur les espèces avant et après la construction. A l'instar des suivis menés sur les parcs Européens cette mesure permettra de surveiller les évolutions de la structure des peuplements bentho-démersaux liées au parc.
- ✓ **La mesure Su1** prévoit une caractérisation du panache turbide créé par les phases de travaux et les modifications éventuelles liées à la présence du parc (mesures à la sonde multiparamètres).
- ✓ **Mesure Su2b :** cette mesure prévoie la réalisation d'état de référence du bruit sous-marin et d'une évaluation du bruit engendré par le parc (suivi acoustique par hydrophones à large spectre de gamme de fréquence).
- ✓ **Mesure SU15(réalisée)** ciblant les effets directs et indirects des EMR sur le réseau trophique à travers l'exemple du projet éolien en mer du Calvados aboutissant à l'élaboration d'une thèse (TROPHIK)
- ✓ **Suivi de la Coquille Saint-Jacques :** un programme suivi pluriannuel pendant les différentes phases du projet sera mis en œuvre pour évaluer spécifiquement les impacts du projet sur la coquille Saint-Jacques (2022,2023,2024,2025 puis en phase d'exploitation). Ce suivi est une extension du projet OASICE (cOquille Saint-JAcques, outil de Surveillance de l'Impact des Câbles Electriques), mené par le CNRS et TBM qui vise à évaluer l'incidence des CEM du câble IFA et des câbles de raccordement du parc éolien (maitrise d'ouvrage de RTE).

Le projet est également un site pilote dans plusieurs programmes internationaux de surveillance de la ressource halieutique dans le cadre des projets d'exploitation d'énergie renouvelable en mer :

- ✓ **FISHINTEL :** ce projet collectif regroupe 12 partenaires de 3 pays différents pour l'Installation d'un réseau de mesure par télémétrie acoustique dans la Manche afin de surveiller les espèces mobiles (bar commun, lieu, thon rouge, langouste).
- ✓ **FISHOWF :** Ce Projet collectif regroupe 14 partenaires avec pour objectif de développer pour une surveillance à long terme des communautés de poissons capable de détecter les effets des parcs éoliens offshores. L'objectif est de surveiller les schémas d'occupation et les mouvements des élasmobranches

BIBLIOGRAPHIE

1. Boehlert, G. W. & Gill, A. B. Environmental and ecological effects of ocean renewable energy development. *Oceanography* **23**, 68–81 (2010).
2. Bray, L. *et al.* Expected effects of offshore wind farms on Mediterranean Marine Life. *J. Mar. Sci. Eng.* **4**, (2016).
3. Pezy, J.-P., Raoux, A. & Dauvin, J.-C. The environmental impact from an offshore windfarm: challenge and evaluation methodology based on an ecosystem approach. *Elsevier.* 24 (2020).
4. Halouani, G. *et al.* A spatial food web model to investigate potential spillover effects of a fishery closure in an offshore wind farm. *J. Mar. Syst.* **212**, (2020).
5. Allen, M. C. *et al.* Ecological Monitoring and Mitigation Policies and Practices at Offshore Wind Installations in the United States and Europe. (2020).
6. Lindeboom, H., Degraer, S., Dannheim, J., Gill, A. B. & Wilhelmsson, D. Offshore wind park monitoring programmes, lessons learned and recommendations for the future. *Hydrobiologia* **756**, 169–180 (2015).
7. Komusanac, I., Brindley, G., Fraile, D. & Ramirez, L. Wind energy in Europe: 2020 Statistics and the outlook for 2021-2025. 1–36 (2021).
8. Lindeboom, H. J. *et al.* Short-term ecological effects of an offshore wind farm in the Dutch coastal zone; Acompilation. *Environ. Res. Lett.* **6**, (2011).
9. Bergström, L. *et al.* Effects of offshore wind farms on marine wildlife - A generalized impact assessment. *Environ. Res. Lett.* **9**, (2014).
10. English, P. *et al.* Improving Efficiencies of National Environmental Policy Act Documentation for Offshore Wind Facilities Case Studies Report. *US Dept. Inter. Bur. Ocean Energy Manag. Off. Renew. Energy Programs. OCS Study 2017-026* 296 (2017).
11. Degraer, S. *et al.* Offshore wind farm artificial reefs affect ecosystem structure and functioning: A synthesis. *Oceanography* **33**, 48–57 (2020).
12. Gill, A. B. *et al.* Special Issue on Understanding the Effects of Offshore Wind Energy Development on Fisheries Setting the Context for Offshore Wind Development Effects on Fish and Fisheries. **33**, (2021).
13. De Backer, A., Buyse, J. & Hostens, K. a Decade of Soft Sediment Epibenthos and Fish Monitoring At the Belgian Offshore Wind Farm Area. *Environ. Impacts Offshore Wind Farms Belgian Part North Sea Empir. Evid. Inspiring Prior. Monit. Res. Manag.* 79–113 (2020).
14. Taormina, B. *et al.* A review of potential impacts of submarine power cables on the marine environment: Knowledge gaps, recommendations and future directions. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **96**, 380–391 (2018).
15. Carlier, A., Vogel, C. & Alemany, J. Synthèse des connaissances sur les impacts des câbles électriques sous-marins : phases de travaux et d'exploitation. 102 (2019).
16. Parc éolien en mer du Calvados & In vivo. PARC EOLIEN AU LARGE DE COURSEULLES-SUR- MER ET RACCORDEMENT AU RESEAU ELECTRIQUE. ETUDE SPECIFIQUE DU PROJET DE PARC EOLIEN. +200 (2014).
17. Quiet Ocean. Parc Eolien en Mer de Courseulles-sur-Mer Porter à connaissance relatif aux impacts sonores sous- marins. (2020).
18. Actimar. ETUDE D'IMPACT DU PARC EOLIEN EN MER DU CALVADOS MISE A JOUR DE L'IMPACT DES OPERATIONS DE FORAGE. (2020).
19. Nedwell, J., Langworthy, J. & Howell, D. Assessment of sub-sea acoustic noise and vibration from offshore wind turbines and its impact on marine wildlife; initial measurements of underwater noise during construction of offshore windfarms, and comparison with background

noise Report No. 544 R 042. *Subacoustech Rep. ref 544R0424* (2003).

20. Didrikas, T. & Wijkmark, N. Möjliga effekter på fisk vid anläggning och drift av vindkraftspark på Storgrundet Författare : Tomas Didrikas & Nicklas Wijkmark. (2009).

21. Norro, a, Haelters, J., Rumes, B. & Degraer, S. Underwater noise produced by the piling activities during the construction of the Belwind offshore wind farm (Bligh Bank, Belgian marine waters). *Offshore Wind farms Belgian part North Sea early Environ. impact Assess. Spat. Var. R. Belgian Inst. Nat. Sci. Brussels* 37–51 (2010).

22. Hastings, M. C. & Popper, A. N. Effects of Pile-Driving Sound on Fish. **2005**, (2005).

23. Popper, A. N. & Hawkins, A. D. An overview of fish bioacoustics and the impacts of anthropogenic sounds on fishes. *J. Fish Biol.* **94**, 692–713 (2019).

24. Taormina, B. *et al.* Impact of magnetic fields generated by AC/DC submarine power cables on the behavior of juvenile European lobster (Homarus gammarus). *Aquat. Toxicol.* **220**, (2020).

25. Szostek, C. L., Davies, A. J. & Hinz, H. Effects of elevated levels of suspended particulate matter and burial on juvenile king scallops Pecten maximus. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **474**, 155–165 (2013).

26. Van Hoey, G. *et al. Overview of the effects of offshore wind farms on fisheries and aquaculture*. (2021).

27. Glarou, M., Zrust, M. & Svendsen, J. C. Using artificial-reef knowledge to enhance the ecological function of offshore wind turbine foundations: Implications for fish abundance and diversity. *J. Mar. Sci. Eng.* **8**, (2020).

28. BOEM. Comparison of Environmental Effects from Different Offshore Wind Turbine Foundations. 1–42 (2020).

29. Draget, E. Environmental Impacts of Offshore Wind Power Production in the North Sea. *WWF- Norw.* 48 (2014).

30. Mavraki, N., Degraer, S. & Vanaverbeke, J. Offshore wind farms and the attraction–production hypothesis: insights from a combination of stomach content and stable isotope analyses. *Hydrobiologia* **848**, 1639–1657 (2021).

31. Roach, M. & Cohen, M. Westermost Rough Offshore Wind Farm Shellfish Survey 2017. A study commisioned by the Holderness Fising Industry Group. 56 (2020) doi:10.13140/RG.2.2.15450.57289.

32. Lüdeke, J. Review of 10 Years of Research of Offshore Wind Farms in Germany: The State of Knowledge of Ecological Impacts. *Adv. Environ. Geol. Sci. Eng.* 25–37 (2015).

33. Methratta, E. T. & Dardick, W. R. Meta-Analysis of Finfish Abundance at Offshore Wind Farms. *Rev. Fish. Sci. Aquac.* **27**, 242–260 (2019).

34. Roach, M., Cohen, M., Forster, R., Revill, A. S. & Johnson, M. The effects of temporary exclusion of activity due to wind farm construction on a lobster (Homarus gammarus) fishery suggests a potential management approach. *ICES J. Mar. Sci.* **75**, 1416–1426 (2018).

35. Roach, M. & Cohen, M. Westermost Rough Fish & Shellfish Monitoring Report 2015 ; Including Comparison to Baseline Data 2013 A study conducted for DONG Energy. (2015).

36. Floeter, J. *et al.* Pelagic effects of offshore wind farm foundations in the stratified North Sea. *Prog. Oceanogr.* **156**, 154–173 (2017).

37. Federal Maritime and Hydrographic agency. *Ecological Research at the Offshore Windfarm alpha ventus*. *Ecological Research at the Offshore Windfarm alpha ventus* (2014). doi:10.1007/978-3-658-02462-8.

38. Leonhard, S., Stenberg, C. & Støttrup, J. Effect of the Horns Rev 1 Offshore Wind Farm on Fish Communities Follow-up Seven Years after Construction. *DTU Aqua Rep.* 99 p. (2011).

39. Stenberg, C. *et al.* Long-term effects of an offshore wind farm in the North Sea on fish communities. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **528**, 257–265 (2015).

40. Debusschere, E. *et al.* Effects of offshore wind farms on the early life stages of dicentrarchus labrax. *Adv. Exp. Med. Biol.* **875**, 197–204 (2016).

41. Degraer, S., Brabant, R. & Rumes, B. *Environmental impacts of offshore wind farms in the Belgian part of the North Sea. LEARNING FROM THE PAST TO OPTIMISE FUTURE MONITORING PROGRAMMES*. (2013).

42. Degraer, S., Brabant, R., Rumes, B. & Laurence, V. *ENVIRONMENTAL IMPACTS OF OFFSHORE WIND FARMS IN THE BELGIAN PART OF THE NORTH SEA. MARKING A DECADE OF MONITORING, RESEARCH AND INNOVATION*. (2019).

43. Degraer, S., Brabant, R., Rumes, B. & Vigin, L. *Memoires on the Marine Environment*. (2020).

44. Brind'Amour, A. *et al.* CAPES Capacité trophique des nourriceries de Poissons de l'Estuaire de Seine. pp 70 (2021).

45. Popper, A. N. & Hastings, M. C. The effects of human-generated sound on fish. *Integr. Zool.* **4**, 43–52 (2009).

46. Persohn, C., Helloco, L., Baudinière, E. & Martinez, L. Préconisations pour limiter les impacts des émissions acoustiques en mer d'origine anthropique sur la faune marine. 212 (2020).

47. Tougaard, J., Hermannsen, L. & Madsen, P. T. How loud is the underwater noise from operating offshore wind turbines? *J. Acoust. Soc. Am.* **148**, 2885–2893 (2020).

48. Daly, E. & White, M. Bottom trawling noise: Are fishing vessels polluting to deeper acoustic habitats? *Mar. Pollut. Bull.* **162**, 111877 (2021).

49. Popper, A. N. *et al. Sound Exposure Guidelines for Fishes and Sea Turtles: A Technical Report prepared by ANSI-Accredited Standards Committee S3/SC1 and registered with ANSI. Springer* (2014). doi:10.1007/978-3-319-06659-2.

50. Kastelein, R. a *et al.* Startle response of captive North Sea fish species to underwater tones between 0.1 and 64 kHz. *Mar. Environ. Res.* **65**, 369–377 (2008).

51. Popper, A. N. Effects of anthropogenic sound on fishes. *Fisheries* **28**, 24–31 (2003).

52. Fewtrell, J. L. & McCauley, R. D. Impact of air gun noise on the behaviour of marine fish and squid. *Mar. Pollut. Bull.* **64**, 984–993 (2012).

53. Mooney, T. A., Andersson, M. & Stanley, J. Acoustic Impacts of Offshore Wind Energy on Fishery. *Oceanography* **33**, 82–95 (2020).

54. Vella, G. *et al.* Assessment of the effects of noise and vibration from offshore wind farms on marine wildlife. Report prepared for the Department of Trade and Industry, UK. Report number ETSU W/13/00566/REP DTI/Pub URN 01/1343. (2001).

55. Skalski, J. R., Pearson, W. H. & Malme, C. I. Effects of sounds from a geophysical survey device on catch-per-unit-effort in a hook-and-line fishery for rockfish (Sebastes ssp.). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **49**, 1357–1365 (1992).

56. Hirst, A. G. & Rodhouse, P. G. Impacts of geophysical seismic surveying on fishing success. *Rev. Fish Biol. Fish.* 113–118 (2000).

57. Slabbekoorn, H. *et al.* A noisy spring: the impact of globally rising underwater sound levels on fish. *Trends Ecol. Evol.* **25**, 419–427 (2010).

58. Graham, A. L. & Cooke, S. J. The effects of noise disturbance from various recreational boating activities common to inland waters on the cardiac physiology of a freshwater fish, the largemouth bass (Micropterus salmoides). *Aquat. Conserv Mar. Freshw. Ecosyst* 1315–1324

(2008).

59. Wardle, C. S. *et al.* Effects of seismic air guns on marine fish. *Cont. Shelf Res.* **21**, 1005–1027 (2001).

60. Hawkins, A. D., Pembroke, A. E. & Popper, A. N. Information gaps in understanding the effects of noise on fishes and invertebrates. *Rev. Fish Biol. Fish.* **25**, 39–64 (2015).

61. Debusschere, E. On the effects of high intensity impulsive sound on young European sea bass Dicentrarchus labrax , with special attention to pile driving during offshore wind farm construction. (2016).

62. Norro, A. M. J., Rumes, B. & Degraer, S. J. Differentiating between underwater construction noise of Monopile and jacket foundations for offshore windmills: A case study from the Belgian part of the North Sea. *Sci. World J.* **2013**, 1–7 (2013).

63. Bailey, H. *et al.* Assessing underwater noise levels during pile-driving at an offshore windfarm and its potential effects on marine mammals. *Mar. Pollut. Bull.* **60**, 888–897 (2010).

64. État belge. *Actualisation de l ' évaluation initiale pour les eaux marines belges Directive - cadre Stratégie pour le milieu marin – Art 8 ,*. (2018).

65. Andersson, M. H. *et al. A framework for regulating underwater noise during pile driving. A technical Vindval report, ISBN 978-91-620-6775-5. Swedish Environmental Protection Agency*. *Report* (2016).

66. European Commission. Guidance document on wind energy developments and EU nature legislation. *Wind Energy* (2020).

67. Wilhelmsson, D. *et al. Greening Blue Energy: Identifying and managing the biodiversity risks and opportunities of off shore renewable energy*. (2010).

68. Bouligand, Y. Découvrez plus de documents accessibles gratuitement dans Archimer. *Asp. Recent. la Biol. des Crustac.* **8**, 13–32 (1986).

69. Koschinski, S. & Ludeman, K. Development of Noise Mitigation Measures in Offshore Wind Farm Construction. (2011).

70. Andersson, M. H., Sigray, P. & Persson, L. K. G. *Operational wind farm noise and shipping noise compared with estimated zones of audibility for four species of fish. The Journal of the Acoustical Society of America* vol. 129 (2011).

71. Thomsen, F., Lüdemann, K., Kafemann, R. & Piper, W. Effects of offshore wind farm noise on marine mammals and fish, biola, Hamburg, Germany on behalf of COWRIE Ltd. 62 (2006).

72. Wahlberg, M. & Westerberg, H. Hearing in fish and their reactions to sounds from offshore wind farms. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **288**, 295–309 (2005).

73. Mueller-blenkle, C. *et al. Effects of Pile-Driving Noise on the Behaviour of Marine Fish*. *Design* (2010).

74. BRLi. Etude d'impact : Parc éolien en mer des Iles d'Yeu et de Noirmoutier, ses bases d'exploitation et de maintenance et son raccordement au réseau public de transport d'électricité. Document 1 : Résumé non technique. (2018).

75. Moray Offshore Winfarm (West) Limited. Moray West Offshore Wind Farm - Offshore EIA Report. (2018).

76. Arcadis. RESUME NON TECHNIQUE Norther NV.

77. Edf re. Parc éolien en mer de Fécamp Résumé non technique de l ' étude d ' impact du programme. (2015).

78. Dong Energy Ltd. Westermost Rough Offshore Wind Farm Non-Technical Summary. 16–20 (2009).

79. RPS GROUP PLC. Gunfleet Sands 2 Offshore Wind Farm - Environmental Statement - Prepared on behalf of DONG Energy. 261 (2007).

80. ORSTED. Hornsea Project Three Offshore

Wind Farm Hornsea Project Three Offshore Wind Farm Environmental Statement: Volume 2, Chapter 3-Fish and Shellfish Ecology PINS Document Reference: A6.2.3 APFP Regulation 5(2)(a). **2**, (2018).

81. Jensen, B. S., Klaustrup, M. & Skov, H. EIA Report – Fish. Horns Rev 2 Offshore Wind Farm. Doc. No. 2676-03-001-rev 4. 1–68 (2006).

82. EDF re, DONG Energy, Nass & Wind & Creocean. Parc éolien en mer de Saint-Nazaire Etude d'impacts environnementale. (2014).

83. Greater Gabbard Offshore Winds Ltd. Greater Gabbard Offshore Wind Farm - environmental statement - Airtricit Flour, PMSS. 672 (2005).

84. De Backer, A., Debusschere, E., Ranson, J. & Hostens, K. Swim bladder barotrauma in Atlantic cod when in-situ exposed to pile driving. in *MEMOIRS on the Marine Environment* 25–38 (2017).

85. Bergström, L. *et al. Study of the Fish Communities at Lillgrund Wind Farm – Final Report from the Monitoring Programme for Fish and Fisheries 2002–2010. On behalf of Vattenfall Vindkraft AB. Swedish Agency for Marine and Water Management, Report number 2013:19*. (2013).

86. Wilber, D. H., Carey, D. A. & Griffin, M. Flatfish habitat use near North America's first offshore wind farm. *J. Sea Res.* **139**, 24–32 (2018).

87. Perrow, M. R., Gilroy, J. J., Skeate, E. R. & Tomlinson, M. L. Effects of the construction of Scroby Sands offshore wind farm on the prey base of Little tern Sternula albifrons at its most important UK colony. *Mar. Pollut. Bull.* **62**, 1661–1670 (2011).

88. DHVI, R. H. Mise à jour de l'état actuel des connaissances sur les impacts environnementaux des parcs éoliens offshore. (2020).

89. Boyle, G. & New, P. ORJIP Impacts from Piling on Fish at Offshore Wind Sites: Collating Population Information, Gap Analysis and Appraisal of Mitigation Options. *Carbon Trust* **1**, 247 (2018).

90. TBM. Suivi de la coquille Saint-Jacques dans le cadre du projet de parc éolien en mer du Calvados (état de référence , suivi pendant et après les travaux). 3 (2022).

91. FRANCE ENERGIES MARINES. Présentation FISHINTEL & FISHOWF. (2021).

92. Kok, A. C. M. *et al.* An echosounder view on the potential effects of impulsive noise pollution on pelagic fish around windfarms in the North Sea. *Environ. Pollut.* **290**, 118063 (2021).

93. Goerger, A., Darmaillacq, A. S., Shashar, N. & Dickel, L. Early Exposure to Water Turbidity Affects Visual Capacities in Cuttlefish (Sepia officinalis). *Front. Physiol.* **12**, 1–8 (2021).

94. Au, D. W. T. *et al.* Chronic effects of suspended solids on gill structure, osmoregulation, growth, and triiodothyronine in juvenile green grouper Epinephelus coioides. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **266**, 255–264 (2004).

95. Black, K. P. & Parry, G. D. Entrainment, dispersal, and settlement of scallop dredge sediment plumes: Field measurements and numerical modelling. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **56**, 2271–2281 (1999).

96. Vaselli, S., Bertocci, I., Maggi, E. & Benedetti-Cecchi, L. Effects of mean intensity and temporal variance of sediment scouring events on assemblages of rocky shores. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **364**, 57–66 (2008).

97. Utne-Palm, A. C. Visual feeding of fish in a turbid environment: Physical and behavioural aspects. *Mar. Freshw. Behav. Physiol.* **35**, 111–128 (2002).

98. Westerberg, H., Rännbäek, P. & Frimansson, H. Effects of suspended sediments on cod egg and larvae and on the behaviour of adult herring and cod. *Int. Counc. Explor. Sea, C.* **E:26**, 1–13 (1996).

99. van Berkel, J. *et al.* The effects of offshore wind farms on hydrodynamics and implications for fishes. *Oceanography* **33**, 108–117 (2020).

100. Hammar, L., Wikström, A. & Molander, S. Assessing ecological risks of offshore wind power on Kattegat cod. *Renew. Energy* **66**, 414–424 (2014).

101. Morelle, J. Projet SPORES : Synthèse sur les nutriments et la production primaire dans l'estuaire de la Seine. 84 (2020).

102. Cariou, T. Dynamiques spatiales et temporelles des communautés halieutiques en milieu estuarien : apport de la géostatistique à la compréhension d ' une nourricerie de poissons plats en baie de Seine Thibault Cariou To cite this version : HAL Id : tel-03615086 DE L . (2022).

103. Carlier, A. & Delpech, J.-P. *Impacts des câbles sous-marins sur les écosystèmes côtiers - Cas particulier des câbles électriques de raccordement des parcs éoliens offshore (compartiments benthiques et halieutiques)*. (2011).

104. Hammar, L., Andersson, S. & Rosenberg, R. *Miljömässig optimering av fundament för havsbaserad vindkraft. Rapport 5828*. (2008).

105. DONG Energy, Vattenfall, Danish Energy Authority & Danish Forest and Nature Agency. *Danish Offshore Wind: Key Environmental Issues*. *Energy* (2006).

106. Reubens, J. T. *et al.* Aggregation at windmill artificial reefs: CPUE of Atlantic cod (Gadus morhua) and pouting (Trisopterus luscus) at different habitats in the Belgian part of the North Sea. *Fish. Res.* **139**, 28–34 (2013).

107. Kramer, S. H. & Langhamer, O. Webinar Series Artificial Reefs and Benthic Changes in Relation to MRE Presenters. in (2017).

108. Dannheim, J. *et al.* Benthic effects of offshore renewables: Identification of knowledge gaps and urgently needed research. *ICES J. Mar. Sci.* **77**, 1092–1108 (2020).

109. Sas, H., Have, T. M. Van Der, Kamermans, P. & Lengkeek, W. Flat oyster pilot design in North Sea offshore wind farm. 1–35 (2018).

110. Langhamer, O. Artificial reef effect in relation to offshore renewable energy conversion: State of the art. *Sci. World J.* **2012**, (2012).

111. Mavraki, N., Ulrike, B., Steven, D., Tom, M. & Jan, V. ON THE FOOD-WEB ECOLOGY IN OFFSHORE WIND FARMS AREAS : LESSONS FROM 4 YEARS OF RESEARCH. 115–131 (2020).

112. De Mesel, I., Kerckhof, F., Norro, A., Rumes, B. & Degraer, S. 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**, 37–50 (2015).

113. Paxton, A. B. *et al.* Meta-analysis reveals artificial reefs can be effective tools for fish community enhancement but are not one-size-fits-all. *Front. Mar. Sci.* **7**, (2020).

114. Raoux, A. *et al.* Benthic and fish aggregation inside an offshore wind farm: Which effects on the trophic web functioning? *Ecol. Indic.* **72**, 33–46 (2017).

115. Raoux, A. Approche écosystémique des énergies marines renouvelables: étude des effets sur le réseau trophique de la construction du parc éolien au large de Courseulles-sur-Mer et du cumul d'impacts. 279 (2017).

116. Degraer, S., Brabant, R., Rumes, B. & Vigin, L. *ENVIRONMENTAL IMPACTS OF OFFSHORE WIND FARMS IN THE BELGIAN PART OF THE NORTH SEA. ASSESSING AND MANAGING EFFECT SPHERES OF INFLUENCE*. (2018).

117. Krone, R. *et al.* 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. *Mar. Environ. Res.* **123**, 53–61 (2017).

118. Bergström, L., Sundqvist, F. & Bergström, U. Effects of an offshore wind farm on temporal and spatial patterns in the demersal fish community. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **485**, 199–210 (2013).

119. Langhamer, O., Dahlgren, T. G. & Rosenqvist, G. Effect of an offshore wind farm on the viviparous eelpout: Biometrics, brood development and population studies in Lillgrund, Sweden. *Ecol. Indic.* **84**, 1–6 (2018).

120. Langhamer, O., Holand, H. & Rosenqvist, G. Effects of an Offshore Wind Farm (OWF) on the common shore crab carcinus maenas: Tagging pilot experiments in the Lillgrund Offshore Wind Farm (Sweden). *PLoS One* **11**, 1–17 (2016).

121. Stenberg, C. *et al.* Effect of the Horns Rev 1 Offshore Wind Farm on Fish Communities Follow-up Seven Years after Construction. *DTU Aqua Rep.* 99 p. (2011).

122. Danish Energy Agency. *Key Environmental Issues – a Follow-up*. (2013).

123. May, J. Post-construction Results from The North Hoyle Offshore Wind Farm. (2005).

124. CEFAS. Strategic review of Offshore Wind Farm Monitoring Data associated with FEPA Licence Conditions - FISH-. 45 (2009).

125. Carey, D. A. *et al.* Effects of the block island wind farm on coastal resources lessons learned. *Oceanography* **33**, 70–81 (2020).

126. HDR. Benthic and epifaunal monitoring during wind turbine installation and operation at the Block Island Wind Farm, Rhode Island. **II**, (2020).

127. MEDDE. *Energies Marines Renouvelables. Etude méthodologique des impacts environnementaux et socio-économiques. Version 2012. Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire.* (2012).

128. Buxton, C. D., Hartmann, K., Kearney, R. & Gardner, C. When is spillover from marine reserves likely to benefit fisheries? *PLoS One* **9**, 1–7 (2014).

129. Forcada, A. *et al.* Effects of habitat on spillover from marine protected areas to artisanal fisheries. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **379**, 197–211 (2009).

130. Lester, S. E. *et al.* Biological effects within no-take marine reserves: A global synthesis. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **384**, 33–46 (2009).

131. Wilhelmsson, D. RISKS AND OPPORTUNITIES OF ARTIFICIAL HABITATS IN RELATION TO OFFSHORE Dan Wilhelmsson , PhD. (2013).

132. Leonhard, S. B. *et al. Fish benefits from offshore wind farm development*. file:///Users/deniserisch/Library/Application Support/Papers2/Unknown/2013/2013__Key Environmental Issues ? a Follow-up.pdf%5Cnpapers2://publication/uuid/DAD9EAA0-F798-4C51-B1CC-18B2B801451D (2013).

133. Roach, M. Roach-M Interaction between the Yorkshire coast static gear fishery and offshore wind energy development Biological & Marine Sciences UofH The University of Hull Interaction between the Yorkshire coast static gear crustacean fishery and offshore wind ener. (2020) doi:10.13140/RG.2.2.20483.73766.

134. Hutchison, Z. L., Gill, A. B., Sigray, P., He, H. & King, J. W. Anthropogenic electromagnetic fields (EMF) influence the behaviour of bottom-dwelling marine species. *Sci. Rep.* **10**, 1–15 (2020).

135. Bureau of Ocean Energy Managements. Evaluation of Potential EMF Effects on Fish Species of Commercial or Recreational Fishing Importance in Southern New England Evaluation of Potential EMF Effects on Fish Species of Commercial or Recreational Fishing Importance in Southern New England. (2019).

136. BOEM. Assessment of Potential Impact of Electromagnetic Fields from Undersea Cable on Migratory Fish Behavior. (2016).

137. Gill, A. B. & Taylor, H. *The potential effects of electromagnetic fields generated by cabling between offshore wind turbines upon elasmobranch fishes*. (2001).

138. Bochert, R. & Zettler, M. L. Effect of electromagnetic fields on marine organisms. *Offshore Wind Energy Res. Environ. Impacts* 223–234 (2006) doi:10.1007/978-3-540-34677-7_14.

139. Gill, A. B., Bartlett, M. & Thomsen, F. Potential interactions between diadromous fishes of U.K. conservation importance and the electromagnetic fields and subsea noise from marine renewable energy developments. *J. Fish Biol.* **81**, 664–695 (2012).

140. DHV, R. H. *Update on the Current state of Knowledge on the Environmental Impacts of Offshore Wind Farms*. (2020).

141. Thomsen, F. *et al. MaRVEN – Environmental Impacts of Noise, Vibrations and Electromagnetic Emissions from Marine Renewable Energy*. (2015).

142. Hutchison, Z. L., Secor, D. H. & Gill, A. B. The interaction between resource species and electromagnetic fields associated with electricity production by offshore wind farms. *Oceanography* **33**, 96–107 (2020).

143. Kavet, R., Wyman, M. . & Klimley, A. P. Assessment of Potential Impact of Electromagnetic Fields from Undersea Cable on Migratory Fish Behavior. Report by Electric Power Research Institute (EPRI). *Final Tech. Rep.* 87 (2016).

144. Snoek, R., de Swart, R., Didderen, K., Lengkeek, W. & Teunis, M. Potential effects of electromagnetic fields in the Dutch North Sea Phase 1 – Desk Study. 95 (2016).

145. Anderson, J. M., Clegg, T. M., Véras, L. V. M. V. Q. & Holland, K. N. Insight into shark magnetic field perception from empirical observations. *Sci. Rep.* **7**, 1–15 (2017).

146. Gill, A. B. *et al. COWRIE 2 . 0 Electromagnetic Fields (EMF) : EMF-sensitive fish response to EM emissions from sub- sea electricity cables of the type used by the offshore renewable*. *Contract* (2009).

147. Scott, K., Harsanyi, P. & Lyndon, A. Understanding the effects of electromagnetic field emissions from Marine Renewable Energy Devices (MREDs) on the commercially important edible crab, Cancer pagurus (L.). *Front. Mar. Sci.* **5**, 4–6 (2018).

148. ICES. OSPAR request to advise on the current state and knowledge of studies into the deployment and environmental impacts of wet renewable technologies and marine energy storage systems. *Rep. ICES Advis. Comm.* 1–75 (2019).

149. Boatman, M. Electromagnetic Fields. *BOEM* 316–319 (2014) doi:10.1016/B978-0-12-386454-3.00603-5.

150. Normandeau Associates Inc., Exponent Inc., Tricas, T. & Gill, A. *Effects of EMFs from Undersea Power Cables on Elasmobranchs and Other Marine Species. Report prepared under BOEMRE Contract M09PC00014* (2011).

151. Marine Management Organisation. *Review of post-consent offshore wind farm monitoring data associated with licence conditions.* (2014).

152. Walls, R. E.ON Climate & Renewables Analysis of Marine Environmental Monitoring Plan Data from the Robin Rigg Offshore Wind Farm, Scotland (Operational Year 1) Analysis of Marine Environmental Monitoring Plan Data from the Robin Rigg Offshore Wind Farm, Scotlan. **44**, (2010).

153. Boesen, C. & Larsen, J. K. Review report 2005 The Danish Offshore Wind Farm Demonstration Project: Horns Rev and Nysted Offshore Wind Farms Environmental impact assessment and monitoring Prepared for The Environmental Group by DONG Energy and Vattenfall The Danish Offshore Wind Far. (2006).

154. Hammar, L., Perry, D. & Gullström, M. Offshore Wind Power for Marine Conservation. *Open J. Mar. Sci.* **06**, 66–78 (2016).

diverseaty