



Effets écologiques à court terme d'un parc éolien offshore dans la zone côtière néerlandaise ; une compilation

Cet article a été traduit par la Commission Particulière du Débat Public sur les éoliennes en mer en Normandie (du 15 novembre 2019 au 19 août 2020).

Il est mis à la disposition du public sur le site : normandie.debatpublic.fr

Article original :

H J Lindeboom et al, Environmental Research Letters
Short-term ecological effects of an offshore wind farm in the Dutch coastal zone; a compilation
, 2011 Environ. Res. Lett. 6 035101

Vous pouvez retrouver le texte original dans la bibliothèque du débat.

Effets écologiques à court terme d'un parc éolien offshore dans la zone côtière néerlandaise ; une compilation

HJ Lindeboom¹, H J Kouwenhoven², M J N Bergman³, S Bouma⁴, S Brasseur¹, R Daan³, R C Fijn⁴, D de Haan⁵, S Dirksen⁴,

R van Hal⁵, R Hille Ris Lambers⁵, R ter Hofstede⁵, K L Krijgsveld⁴, M Leopold¹ et M Scheidat¹

¹ IMARES, PO Box 167, 1790 AD Den Burg, Pays-Bas

² NoordzeeWind, ^{2nd} Havenstraat 5b, 1976 CE IJmuiden, Pays-Bas

³ Royal NIOZ, PO Box 59, 1790 AB Den Burg, Pays-Bas

⁴ Bureau Waardenburg, PO Box 365, 4100 AJ Culemborg, Pays-Bas

⁵ IMARES, PO Box 68, 1970 AB IJmuiden, Pays-Bas

Courrier électronique : han.lindeboom@wur.nl

Reçu le 25 mars 2011

Accepté pour publication le 14 juillet 2011

Publié le 5 août 2011

En ligne sur stacks.iop.org/ERL/6/035101

Résumé

Le nombre de parcs éoliens en mer augmente rapidement, ce qui soulève des questions sur leur impact environnemental. Aux Pays-Bas, un vaste programme de surveillance est en cours d'exécution dans le premier parc éolien offshore (Offshore Windfarm Egmond aan Zee, OWEZ). Cet article compile les résultats des impacts à court terme (deux ans) sur un grand nombre de groupes fauniques obtenus jusqu'à présent. Des impacts étaient attendus à cause du nouveau substrat dur, des pales de rotor en mouvement, du bruit sous-marin éventuel et de l'exclusion des pêcheries. Les résultats n'indiquent aucun effet à court terme sur le benthos dans la zone sableuse située entre les générateurs, tandis que le nouveau substrat dur des monopiles et la protection contre l'affouillement ont entraîné l'établissement de nouvelles

espèces et de nouvelles communautés fauniques. Le recrutement des bivalves n'a pas été affecté par le parc éolien OWEZ. La composition en espèces des recrues dans la ZEE0 et les zones de référence environnantes est corrélée avec la teneur en boue des sédiments et la profondeur de l'eau, indépendamment de la présence de la ZEE0. L'abondance des recrues dans les OWEZ a été corrélée avec la teneur en boue, ce qui est très probablement attribuable non pas à la présence du parc, mais à l'absence de pêche. La communauté de poissons était très dynamique, tant dans le temps que dans l'espace. Jusqu'à présent, seuls des effets mineurs sur les assemblages de poissons, en particulier à proximité des monopiles, ont été observés. Certaines espèces de poissons, comme la morue, semblent trouver un abri à l'intérieur de la ferme. Plus de clics de marsouins ont été enregistrés à l'intérieur de la ferme que dans les zones de référence à l'extérieur de la ferme. Plusieurs espèces d'oiseaux semblent éviter le parc tandis que d'autres sont indifférentes ou même attirées. Les effets du parc éolien sur un écosystème très variable sont décrits. Dans l'ensemble, le parc éolien OWEZ agit comme un nouveau type d'habitat avec une plus grande biodiversité d'organismes benthiques, une possible augmentation de l'utilisation de la zone par le benthos, les poissons, les mammifères marins et certaines espèces d'oiseaux et une diminution de l'utilisation par plusieurs autres espèces d'oiseaux.

Mots clés : parc éolien offshore, effets écologiques, écosystèmes marins, benthos, poissons, oiseaux, mammifères marins

1. Introduction

La pression en faveur d'une plus grande utilisation des énergies renouvelables est un puissant moteur pour la construction de parcs éoliens offshore. Cela vaut également pour la mer du Nord néerlandaise et, en 2005, le premier parc éolien offshore des

Pays-Bas (parc éolien offshore Egmond aan Zee, OWEZ) a été mis en service. Ce parc a été construit en 2006 et est devenu pleinement opérationnel au début de l'année 2007. Il s'agit du projet de démonstration néerlandais, qui permet d'acquérir des connaissances et de l'expérience pour de futurs parcs éoliens en mer à grande échelle.

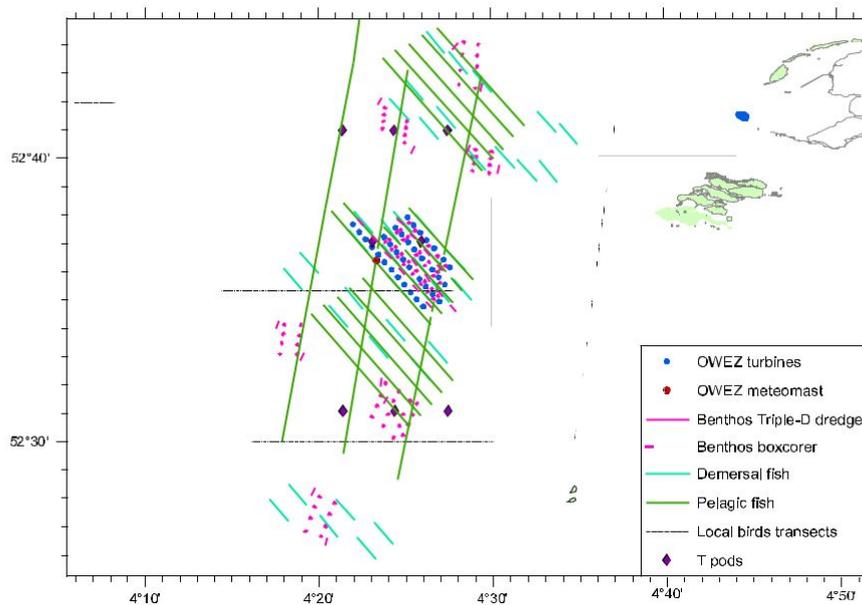


Figure 1. Carte du parc éolien OWEZ, montrant l'emplacement des turbines, du météomât et des sites d'échantillonnage du benthos, des poissons, des oiseaux et des marsouins communs à l'intérieur et à l'extérieur du parc éolien. La partie supérieure droite montre la position du parc éolien le long de la côte néerlandaise.

Une partie du projet consiste en un vaste programme de surveillance et d'évaluation de l'environnement. Ce programme vise à déterminer les effets possibles du parc éolien sur les organismes benthiques, les poissons, les oiseaux et les mammifères marins. Une attention particulière est accordée aux niveaux sonores et aux effets acoustiques. Les principaux effets potentiels de l'établissement d'un parc éolien sont la perturbation de la zone pendant la phase de construction, la présence du parc et l'exclusion d'autres utilisations pendant la phase d'exploitation.

Avant la phase de construction, un vaste programme de base a été exécuté en 2003-2004. Pendant la phase de construction, les effets de la construction ont été étudiés et ils ont notamment indiqué que le martèlement des pieux de fondation atteignait des niveaux sonores suffisamment élevés pour causer des dommages aux mammifères marins. Pour les marsouins communs (*Phocoena phocoena*), aucune recherche spécifique n'a été menée. Pour les phoques communs (*Phoca vitulina*), les données télémétriques ont indiqué que les activités de battage des pieux semblent dissuader les phoques. Lors de l'enfoncement des pieux, les phoques marqués ont évité la zone sur au moins 40 km (Brasseur et al 2010).

Les recherches menées dans les parcs éoliens offshore danois ont indiqué un comportement d'évitement des mammifères marins pendant la phase de construction (Tougaard et al 2009). Pendant la phase opérationnelle, aucune différence n'a pu être détectée entre la présence de marsouins communs à l'intérieur et à l'extérieur des parcs éoliens danois (Diederichs et al 2008). Le seul effet observé a été un changement dans le cycle de 24 heures des enregistrements de marsouins communs, avec davantage d'enregistrements pendant la nuit à proximité des éoliennes individuelles. Il est très probable que cela soit lié aux différences entre les communautés de poissons (Diederichs et al 2008). Les enregistrements du bruit sous-marin ont montré que l'audibilité du bruit des turbines était faible pour les marsouins communs, s'étendant de 20 à 70 m des fondations, alors que l'audibilité pour les phoques communs allait de moins de 100 m à plusieurs kilomètres (Tougaard et al 2009). Les réactions comportementales des marsouins au bruit semblent peu probables à moins d'être très proches des turbines. Des réactions des phoques ne peuvent être exclues jusqu'à des distances de quelques centaines de mètres (Tougaard et al 2009).

Au Danemark, des recherches ont également été menées pour voir si les oiseaux réagissent aux turbines une fois qu'elles sont installées. La comparaison des relevés aériens effectués avant et après la construction sur l'abondance et la distribution des oiseaux d'eau dans et autour de deux fermes offshore a généralement montré que les oiseaux d'eau évitaient les turbines, au moins pendant les trois années suivant la construction (Petersen et al 2006). Dans ces mêmes fermes, une augmentation des organismes benthiques et des poissons sur et autour des substrats durs a été constatée (Leonhard et Pedersen 2006).

Dans cette lettre, nous nous concentrons sur les effets écologiques du parc éolien OWEZ en phase d'exploitation. Les impacts possibles sont attendus de :

- le nouveau substrat dur ;
- le bruit sous-marin ;
- les pales de rotor en mouvement ;
- l'absence d'autres utilisations humaines, comme la pêche.

Les effets sur les différents groupes fauniques et sur l'écosystème local seront abordés.

1.1. Le parc éolien offshore d'Egmond aan Zee (OWEZ)

L'OWEZ est située entre 10 et 18 km au large des côtes néerlandaises, près d'Egmond aan Zee (au nord-ouest d'Amsterdam), à des profondeurs d'eau comprises entre 17 et 21 m. Elle se compose de 36 éoliennes Vestas V90 d'une puissance installée totale de 108 MW placées sur des tours d'acier de 70 m de haut et de 4,6 m de diamètre (figure 1). La hauteur totale des turbines, y compris le rotor, est de 115 m. Le parc éolien se compose de quatre rangées de turbines à une distance d'environ 1 km, avec une distance minimale de 650 m entre les turbines. La surface totale du parc éolien est d'environ 40 km². La fondation de chaque turbine est constituée d'un pilier en acier martelé dans le fond de la mer jusqu'à pénétration.

Pour éviter l'affouillement, une couche de pierres, d'un diamètre d'environ 25 m, composée d'une couche filtrante de roches de petite taille et d'une couche supérieure de roches plus lourdes, a été installée autour de chaque pile.

Un mât de mesure météorologique de 116 m (météomât) a également été installé, adapté pour soutenir l'équipement scientifique ou les observateurs.

La ferme a été construite en 2006 et est devenue pleinement opérationnelle le 1er janvier 2007. La ferme et une zone de sécurité environnante de 500 m sont fermées à toute activité de transport maritime, à l'exception des navires destinés à la maintenance ou à la recherche. Toute pêche est interdite dans le parc éolien et la zone de sécurité.

2. Méthodes

Nous allons ici décrire brièvement les différentes méthodes utilisées. Pour plus de détails, nous renvoyons le lecteur aux rapports sur les différents groupes faunistiques qui sont disponibles ou seront bientôt disponibles sur [http : //www.noordzeewind.nl/reports data 65.html](http://www.noordzeewind.nl/reports_data_65.html).

2.1. Le benthos

2.1.1. L'impact sur la communauté locale du macrobenthos.

Avant la construction du parc éolien, une étude de base (T0) a été menée en 2003 par l'Institut d'études estuariennes et côtières (IECS) de l'Université de Hull. Les résultats de cette étude de base ont été présentés dans un rapport (Jarvis et al 2004), qui décrit en détail le plan d'échantillonnage choisi, les méthodes utilisées et la distribution de la faune macrobenthique avant le début de la construction du parc éolien. Au cours de cette étude T0, la faune de la région a été échantillonnée dans trois sous-zones : OWEZ elle-même et deux zones de référence. Nous avons effectué une analyse de puissance sur les données T0 afin d'évaluer si le plan d'échantillonnage T0 était adéquat pour détecter les effets possibles après la construction (T1) avec une signification statistique (Daan et al 2009). Le résultat de l'analyse de puissance a montré que le maintien du plan d'échantillonnage initial impliquerait que seules des différences extrêmement importantes seraient détectables avec une quelconque signification statistique et que, d'un point de vue statistique, le nombre de zones de référence était trop faible. Il a donc été décidé de répartir l'effort d'échantillonnage à T1 sur des zones de contrôle plus nombreuses et plus petites. Cela implique que les effets éventuels dans la zone du parc éolien devraient être détectés sur la base des différences instantanées entre le macrobenthos dans le parc éolien et dans les zones de référence à T1, plutôt qu'en comparant mutuellement les données de T0 et T1.

L'étude benthique T1 a été réalisée au printemps 2007, quelques mois après l'achèvement du parc éolien, pour étudier les effets possibles à court terme de la présence d'OWEZ sur la composition de la faune benthique locale vivant dans ou sur les sédiments. La faune benthique a été échantillonnée dans la zone sableuse à l'intérieur de la ferme et dans six zones de référence situées au nord et au sud de celle-ci. L'échantillonnage a été effectué à l'aide d'un buissier de 0,078 m², en prélevant 30 échantillons à l'intérieur de l'exploitation et 15 échantillons dans chacune des zones de référence (voir figure 1). En outre, un programme d'échantillonnage limité a été mis en place avec une drague Triple-D (largeur de la plaque de coupe 20 cm, profondeur de fouille 18 cm), qui a permis de prélever 14 échantillons à l'intérieur de l'exploitation et 2 échantillons dans chacune des zones de référence.

Le programme de dragage visait à donner une idée des changements possibles à court terme dans la grande faune du parc éolien, où la pêche n'est pas autorisée et où la faune de fond pourrait se développer dans un environnement sans perturbation des engins de chalutage. Le programme était toutefois limité, car il était prévu qu'un changement mesurable parmi les grandes espèces benthiques ne pouvait être attendu qu'après au moins plusieurs années sans pêche.

Les échantillons de boxcore ont été passés à bord à travers un tamis à mailles de 1 mm et le résidu a été conservé dans une solution de formaldéhyde neutralisé à 6 % pour une analyse ultérieure en laboratoire. Les prises de la drague ont été triées et comptées à bord. L'apparition d'effets éventuels a été analysée en comparant les caractéristiques du macrobenthos dans le parc éolien avec celles des zones de référence. Pour une description détaillée de toutes les méthodes utilisées, voir Daan et al (2009).

2.1.2. L'impact sur le recrutement des bivalves.

Pour mesurer la différence possible de densité des juvéniles bivalves (colons en 2007) à l'intérieur et à l'extérieur de la ZEEO, 20 stations à l'intérieur du parc éolien fermé à la pêche et 10 stations dans chacune des 5 zones de référence régulièrement chalutées ont été échantillonnées à l'aide d'un buis circulaire (profondeur 20 cm, diamètre 30 cm) en octobre 2007 (Bergman et al 2010). Par carottier,

trois sous-échantillons (diamètre 10 cm, hauteur 5 cm) ont été collectés et stockés avec du formol tamponné à 4 %. Le nombre d'espèces de bivalves juvéniles > 0,2 mm et > 0,5 mm a été compté après une procédure de décantation et de tamisage (pour plus de détails, voir Bergman et al 2010). La taille des grains et la teneur en boue des 10 cm supérieurs du sédiment ont été analysées à partir des mêmes échantillons de carottes en boîte. Pour étudier la réponse de la sédimentation des larves de bivalves à une gamme de types de sédiments se développant de manière concevable dans le parc éolien OWEZ sans pêche, des expériences *in situ en* mésocosme ont été réalisées. Des atterrisseurs benthiques submergés avec des plateaux contenant trois fractions différentes de sédiments sableux défaunés (fins (200-500 μm), moyens (500-1000 μm) et grossiers (> 1000 μm)) ont été déployés pendant deux périodes de trois semaines en 2007 à l'intérieur et à l'extérieur du parc éolien. Le nombre de recrues bivalves a été déterminé par fraction de sédiment, comme décrit par Bergman et al (2010).

2.1.3. Le substrat dur.

Le développement de la flore et de la faune sur les substrats durs des monopiles et des rochers des couches de protection contre l'affouillement a été enregistré à l'aide de séquences vidéo et d'échantillons recueillis par des plongeurs. Les échantillons ont été collectés autour de trois monopiles et la composition des espèces, couvrant les pourcentages et le nombre ainsi que la biomasse des espèces présentes, a été établie. Pour plus de détails, voir Bouma et Lengkeek (2009).

2.2. Mesures acoustiques sous-marines

En 2007, au cours de trois opérations d'éoliennes, des séances de mesures acoustiques ont été effectuées à l'aide d'un bateau de pêche sportive de 12 m qui dérivait passivement avec tous ses équipements éteints (de Haan et al 2007a, 2007b). Les mesures impliquent des séries de 7 à 10 fichiers par session ; les enregistrements des fichiers ont couvert une durée de 38 s. Les émissions acoustiques ont été mesurées dans une gamme de distances variant entre 10 et 3000 m en utilisant un hydrophone calibré certifié RESON 4032 (sn 2005017) suspendu au-dessus du navire à une profondeur de 7 m. Le RESON 4032 est équipé d'un préamplificateur intégré de 10 dB, et sa sensibilité est de -170 dB pour 1 V μPa -1. Le signal de l'hydrophone est conditionné par l'utilisation d'un préamplificateur ETEC avec filtrage passe-haut et passe-bas sur une bande de fréquence de 10 Hz- 20 kHz. Le signal analogique conditionné est numérisé à l'aide d'un convertisseur analogique-numérique Avisoft à une fréquence d'échantillonnage de 50 kHz. Ce convertisseur est connecté à la porte USB par laquelle les fichiers sonores numériques continus sont enregistrés au format WAV.

2.3. Poissons

L'abondance des poissons pélagiques a été estimée par des relevés au chalut et des relevés acoustiques. Des observations ont été faites dans la zone OWEZ et dans deux zones de référence, l'une au nord et l'autre au sud du parc (figure 1). Les relevés ont été effectués en avril et octobre 2003, et après la construction de la ferme en avril 2007. Toute la zone a été observée avec l'équipement acoustique, et lorsque des bancs de poissons ont été observés, des chaluts avec un filet semi-pélagique ont été faits. Pour plus de détails, voir Grift et al (2004) et Ybema et al (2009).

Les poissons démersaux ont été échantillonnés avec deux chaluts à perche de 6 m, l'un équipé d'un filet de 40 mm et l'autre d'un filet de 20 mm. Les chaluts ont été effectués dans la zone OWEZ (13 traits) et dans trois zones de référence (figure 1), une au nord (13 traits) et deux au sud (6 et 8 traits). Les relevés démersaux ont été effectués en été 2003 et en hiver 2004 et, après la construction, en été 2007 et en hiver 2008. Pour plus de détails, voir Hille Ris Lambers et Ter Hofstede (2009), Ter Hofstede (2008) et Tien et al (2004).

2.4. Marsouins communs

L'activité et la présence des marsouins communs ont été mesurées à l'aide de huit détecteurs acoustiques fixes de marsouins (T-POD) (Scheidat *et al* 2009). Deux T-POD ont été placés dans le parc éolien et trois T-POD ont été placés dans chacune des zones de référence au nord et au sud du parc éolien (figure 1). L'activité acoustique des marsouins (exprimée par quatre indicateurs : minutes positives de marsouins, pourcentage de minutes positives de marsouins par jour, durée de la rencontre et temps d'attente) a été mesurée pendant l'étude de référence avant la construction du parc éolien (juin 2003-mai 2004) ainsi que pendant la période pendant laquelle le parc était pleinement opérationnel (juin 2007-avril 2009). Pour étudier l'effet potentiel du parc éolien, une analyse statistique avant-après contrôle-impact (BACI) (Green 1979) a été réalisée ; pour plus de détails, voir Scheidat *et al* (2009) et Scheidat *et al* (2011).

2.5. Phoques communs

Pour étudier l'effet du parc éolien sur les phoques communs, 34 phoques ont été marqués avec des étiquettes satellites (Brasseur *et al* 2010). Douze phoques ont été marqués avant la construction de la ferme et 22 après la phase de construction ; la moitié de ces phoques ont été marqués au sud de la ferme, l'autre moitié au nord de la ferme. Les phoques ont été capturés dans des échoueries à l'aide d'une grande senne et marqués directement sur place. Des enregistreurs de données relayés par satellite ont transmis par le système ARGOS et plus tard par téléphone GPS. Des étiquettes ont été utilisées pour suivre les phoques. Les balises ARGOS et GPS ont été construites par la Sea Mammal Research Unit (St Andrews, Royaume-Uni). Les données ont été récupérées et les habitudes de nage des phoques individuels et des groupes relâchés ont été cartographiées par rapport au site du parc éolien (figure 1). Pour plus de détails, voir Brasseur *et al* (2010).

2.6. Les oiseaux de mer locaux

Les schémas de distribution des oiseaux de mer locaux ont été établis lors de comptages bimestriels de navires le long de 10 transects dans et autour du parc éolien OWEZ. Les données sur les densités ont été collectées à l'aide de techniques de recensement par bandes (Leopold *et al* 2004). Les densités obtenues au cours de 6 études pendant la période T0 (septembre 2002-février 2004) ont été comparées aux densités obtenues au cours de 12 études réalisées pendant la période T1 (avril 2007-janvier 2009). Au cours des enquêtes T0, il a été constaté que les modèles de distribution étaient influencés par la localisation dans la zone d'étude. La distance par rapport à l'isobathe de 20 m et la localisation le long de l'axe nord-sud de la zone d'étude se sont toutes deux révélées importantes. Afin de déterminer si les trois zones d'impact (deux parcs éoliens et une zone d'ancrage) ont un effet sur la répartition des différentes espèces d'oiseaux, il faut tenir compte de leurs schémas de distribution naturels. Comme ces derniers ne peuvent pas nécessairement être décrits à l'aide de relations linéaires, une modélisation additive généralisée (MAG), qui utilise des fonctions de lissage pour modéliser les relations non linéaires (Wood 2006, Zuur *et al* 2007), a été appliquée aux données. Les distributions d'oiseaux ont été modélisées dans l'environnement statistique et de programmation "R" (v2.9.2 ; R Development Core Team 2009), en utilisant les progiciels "mgcv" (Wood 2009) et "nlme" (Pinheiro *et al* 2006) et en utilisant la distance à la côte et au nord comme facteurs de lissage et le parc éolien comme facteur supplémentaire. Les données ont été analysées au niveau des enquêtes individuelles ; pour plus de détails, voir Leopold *et al* (2004, 2009).

2.7. Oiseaux volants

Pour évaluer les trajectoires des oiseaux qui traversent le parc éolien, des observations visuelles et des observations radar entièrement automatisées ont été effectuées à partir du météomât (figure 1) du parc éolien (Krijgsveld *et al* 2010). Les observations visuelles ont été effectuées de jour par balayage panoramique à l'aide d'une paire de jumelles standard de 10 × 42 fixées sur un trépied. Les trajectoires de vol d'oiseaux individuels ou de groupes d'oiseaux ont été enregistrées. Pour détecter les trajectoires de vol en continu, de jour comme de nuit et à plus grande échelle, deux types d'observations radar ont été combinés : horizontale et verticale. Les observations des trajectoires de vol ont été effectuées à l'aide d'un radar de surveillance marine horizontale (bande S). Les observations des flux et de l'altitude ont été effectuées avec un radar similaire (bande X) qui a été incliné pour tourner verticalement. Ensemble, ces radars ont formé un système de radar Merlin Avian (DeTect Inc.). Pour plus de détails, voir Krijgsveld *et al* (2010).

Il était également destiné à enregistrer les collisions des oiseaux avec les éoliennes et plusieurs techniques utilisant un certain type de capteur, qui déclenche la sauvegarde des images des caméras filmant la zone des pales du rotor, ont été envisagées. Cependant, jusqu'à présent, aucune technique fiable n'a été trouvée qui pourrait être appliquée dans le parc éolien OWEZ.

3. Résultats

3.1. Le benthos

3.1.1. L'impact sur la communauté locale du macrobenthos.

Comme indiqué dans la section sur les méthodes, il a été décidé d'exécuter un programme différent dans le T1 par rapport au T0. Par conséquent, aucune comparaison n'a été faite entre le T0 et le T1 et les résultats sont basés sur les données du parc éolien et des zones de référence. La comparaison des caractéristiques de la macrofaune à l'intérieur de la ZEEO avec six zones de référence permet de conclure qu'il n'y avait pas de différences majeures quelques mois après l'achèvement du parc éolien (Daan *et al* 2009). Cette conclusion est basée sur les résultats suivants.

L'indice de Bray-Curtis pour la similarité en pourcentage a montré une grande à très grande similarité (60-85%) dans la composition de la faune des ZEEO et de la majorité des zones de référence. Les densités globales de la faune, les valeurs globales de la biomasse et la diversité, exprimées en termes de richesse, d'uniformité et de dominance des espèces dans les ZEEO, se situaient bien dans la fourchette trouvée dans les zones de référence. L'abondance relative de la faune dans les ZEEO n'était pas statistiquement différente de celle des zones de référence.

Les analyses statistiques des différences de densités moyennes de 22 espèces individuelles capturées avec le boxcorer dans les sept zones ont montré une différence significative dans 6 cas. Mais pour toutes les espèces testées, la densité trouvée dans la ZEEO était dans la fourchette de densité d'au moins 5 des 6 zones de référence. La même chose a été faite pour 10 espèces collectées avec une drague Triple-D, montrant que pour aucune de ces espèces, il n'y avait de différence significative entre les échantillons collectés dans les ZEEO et en dehors des ZEEO.

Toutes les analyses ont indiqué que la construction et la présence du parc éolien n'ont aucun effet à court terme sur la composition de la faune benthique locale dans les zones sableuses situées entre les monopiles (Daan *et al* 2009). Un échantillonnage supplémentaire à un stade ultérieur est nécessaire pour établir les éventuels effets à long terme.

3.1.2. L'impact sur le recrutement des bivalves.

L'enquête sur le terrain n'a révélé aucune différence entre les densités de recrues de bivalves ($> 0,2$ et $> 0,5$ mm) installées dans les ZEEO et dans les cinq zones de référence au cours des neuf premiers mois de 2007. Pour les plus grandes (plus âgées) recrues $> 0,5$ mm, des différences de densités n'ont été constatées qu'entre deux des zones de référence : 383 m⁻² dans la Ref 3 et 113 m⁻² dans la Ref 5. Parmi les recrues $> 0,5$ mm qui ont pu être identifiées au niveau de l'espèce, seul *Ensis spp.* a montré une différence significative de densité entre les zones (de référence) : 154 m⁻² dans la Ref 3 et aucune dans la Ref 4 (Bergman et al 2010).

On n'a pas trouvé de différences basées sur la zone dans la composition des espèces de bivalves recrues $> 0,5$ mm. L'analyse des groupes de stations a révélé deux groupes significatifs attribués à des différences de densité, principalement d'*Ensis spp.*, *Montacuta ferruginosa*, *Tellina spp.* et *Abra alba*. La position des grappes ne coïncidait pas avec les zones d'étude mais suggérait un gradient de composition des espèces au large des côtes. Le groupe de stations situées près de la côte abritait une population de bivalves beaucoup plus dense que le groupe situé plus au large ; la composition des espèces dans le groupe côtier était corrélée à une teneur en boue plus élevée et à des profondeurs d'eau supérieures à 18-20 m. Dans le parc éolien, des corrélations significatives ont été trouvées entre les variables environnementales et l'abondance totale et l'abondance des bivalves par espèce recrues $> 0,5$ mm. La teneur en boue a obtenu le coefficient de corrélation le plus élevé. Dans les zones de référence, aucune corrélation de ce type n'a été trouvée. Ici, le couplage entre les caractéristiques des sédiments et les recrues bivalves peut être diminué par une remise en suspension comme celle causée par le chalutage et/ou les vents forts (Bergman et al 2010).

Les expériences en mésocosme ont révélé que les bivalves qui se déposent ne montrent aucune préférence pour les fractions de sable que nous avons utilisées dans les déploiements dans les OWEZ et Ref L. Dans le second déploiement, dans des sédiments grossiers uniquement, la sédimentation a été remarquablement plus importante dans Ref L que dans les OWEZ. Comme le nombre de colons dans les fractions fines et moyennes n'était pas significativement différent dans les ZEO et dans la Ref L, le résultat peut indiquer que les sédiments grossiers sont plus attractifs pour certaines espèces de bivalves dans les zones proches de la côte comme la Ref L. Les larves de bivalves compétentes sont arrivées par plaques dans la zone côtière, provoquant un schéma temporel dans la colonisation. Des différences de longueur des colons n'ont pas été trouvées dans les déploiements dans les ZEEO et la Ref L (Bergman et al 2010).

Le peuplement net moyen des bivalves dans les mésocosmes de la ZEEO a varié de 1 565 m⁻²/jour en juillet à 324 m⁻²/jour en août, tandis que 816 m⁻²/jour se sont établis avec succès dans la Ref L en août. En octobre 2007, plusieurs mois après l'installation initiale, les densités de bivalves recrutés ($> 0,2$ mm) variaient de 4312 à 1558 m⁻² dans l'OWEZ et la Ref L, respectivement, tandis que les densités de bivalves recrutés $> 0,5$ mm variaient de 429 à 121 m⁻². Ces données suggèrent une perte considérable de recrues bivalves au cours des premiers mois d'installation en situation de terrain (Bergman et al 2010).

Les effets indirects de l'arrêt de la pêche dans les ZEEO, tels qu'une colonne d'eau moins turbide permettant une meilleure croissance des bivalves, et des sédiments plus fins permettant une plus grande richesse en espèces, sont peu probables. La turbidité et la taille médiane des grains dans les ZEEO sont principalement régies par les régimes des marées et des vents (vagues), ainsi que par les dépôts de boue locaux.

3.1.3. Colonisation des substrats durs.

En 2008, un total de 33 espèces différentes ont été identifiées dans les séquences vidéo et/ou des échantillons ont été prélevés sur trois monopiles différents (Bouma et Lengkeek 2009). Le long des monopiles, on a pu distinguer deux zones claires de deux communautés de substrats durs.

- Une zone supérieure (7-10 m de profondeur) dominée par les moules communes à croissance rapide (*Mytilus edulis*) avec une faune associée de balanes (*Balanus crenatus* et *Balanus balanoides*), l'étoile de mer commune (*Asterias rubens*), plusieurs espèces de vers et de crabes et le tapis marin incrustant (*Conopeum reticulum*). Les moules couvraient une surface comprise entre 80 et 100 %, où les zones dénudées étaient colonisées par des anémones (principalement *Metridium senile* et *Sargartia spp.*) et (les tubes de) le petit crustacé *Jassa spp.*
- Une zone plus profonde (10 m de fond) dominée par une communauté de (tubes de) *Jassa spp.*, plusieurs espèces d'anémones (*Metridium senile*, *Sargartia spp.* et *Diadumene cincta*) et des plaques de *Tubularia larynx*, qui couvrent 100% des monopiles sous la zone des moules.

Parmi les autres espèces moins courantes, on trouve la coque de la poulette des tapis (*Venerupis senegalensis*), le crabe de la mer du Nord ou crabe tourteau (*Cancer pagurus*), la crevette squelette (*Caprella linearis*), l'ophioglosse commun (*Ophiotrix fragilis*) et des espèces exotiques comme l'huître japonaise (*Crassostrea gigas*) et la balane de gland du Titan (*Megabalanus coccopoma*).

En septembre 2008, les moules communes de la zone supérieure ont atteint une moyenne de 6725 individus m⁻² avec une biomasse de 1257 g de poids sec sans cendres (afdwt)/m². La biomasse totale des moules dans la ZEE0 a été estimée à 11 500 kg afdwt.

Sur les rochers de protection contre l'affouillement autour de trois monopiles, 11, 14 et 17 espèces ont été détectées, respectivement. Les espèces les plus dominantes sont le tapis de mer *Conopeum reticulum*, les anémones *Metridium senile* et *Sargartia spp.* (tubes de) le crustacé *Jassa spp.* et le tubulaire annelé *Tubularia larynx*. Parmi les autres espèces, citons l'étoile de mer commune, le crabe de la mer du Nord, l'huître japonaise, la crépidule (*Crepidula fornicata*), les balanes, l'hydroïde *Obelia spp.* et la croûte d'orange (*Cryptosula pallasiana*). Les images vidéo indiquent que le nouveau substrat dur fournit également un abri et de la nourriture pour des espèces de poissons comme le cabillaud de la mer du Nord (*Gadus morhua*) et la moue (*Trisopterus luscus*). Récemment, un couple d'eiders à duvet (*Somateria mollissima*) a été vu en train de fouiller les mollusques dans la ZEE0.

3.2. Acoustique sous-marine

Les mesures des caractéristiques acoustiques sous-marines du parc éolien en exploitation ont été entravées par la méthode de mesure et le manque de disponibilité de navires de mesure appropriés (de Haan et al 2007b, 2007a). Un nouveau système de bouées dérivantes séparées avec hydrophones a été développé et sera déployé à l'avenir sous réserve de l'approbation des autorités de mise en service. Les mesures préliminaires avec l'ancien dispositif de mesure utilisant un petit bateau comme plate-forme et un hydrophone suspendu sur le côté du bateau ont donné les indications suivantes.

À des vitesses de vent relativement faibles (entre 1,8 et 9,7 m s⁻¹), l'énergie du bruit des turbines atteignait son maximum dans la bande des basses fréquences entre 875 et 1500 Hz, avec des niveaux de bruit équivalents à large bande (Leq) variant entre 125 et 130 dB pour 1 μPa^2 s (moyennes temporelles de 10 s) et n'était détectable que dans une plage allant jusqu'à 300 m. En dessous de cette plage de distance, les niveaux de Leq augmentaient de 4 à 5 dB. Dans un cas, un niveau de bruit élevé a été détecté, identifié comme étant un bruit hydraulique provenant du système mécanique pour régler la

direction du rotor en fonction des conditions de vent changeantes. Ce bruit a atteint son maximum à 1500 Hz et 32 kHz et a augmenté les niveaux de bruit dans ces bandes particulières de 8 et 10 dB. Tous les résultats indiquent de faibles niveaux de bruit à des vitesses de vent plus faibles. Cependant, il faut effectuer davantage de mesures avec un système plus élaboré et à des vitesses de vent plus élevées avant de pouvoir tirer des conclusions plus précises (de Haan et al 2007a).

3.3. Poissons

L'étude de base réalisée en avril et octobre 2003 a montré une communauté de poissons pélagiques très dynamique composée de neuf espèces. En termes de biomasse, le maquereau (*Scomber scombrus*) était l'espèce la plus importante en avril et en octobre 2003 alors que d'autres enquêtes menées la même année ont montré que le hareng (*Clupea harengus*) et le sprat (*Sprattus sprattus*) dominaient en novembre et le lançon (*Ammodytes marinus* et *Ammodytes tobianus*) en juin (Grift et al 2004). Le fait que la communauté soit très dynamique a été confirmé par l'enquête T1 d'avril 2007. La composition par espèce des captures dans l'ensemble de la zone côtière (donc à l'intérieur et à l'extérieur de la ferme) était différente de celle observée quatre ans plus tôt (Ybema et al 2009). En 2007, de grandes quantités de lançons dominaient les prises et la production acoustique, alors qu'en 2003, les bancs de harengs étaient les plus dominants. En 2007, les lançons migraient quotidiennement à l'intérieur et autour du parc éolien et aucun signe d'évitement du parc n'a été détecté. Les conditions environnementales globales des deux années étaient tout à fait comparables ; cependant, la température moyenne en 2007 était supérieure d'environ 2 ° C. La température plus élevée est considérée comme la principale explication du changement observé. Dans les eaux plus froides, les lançons sont enfouis dans le sable (Van Deurs et al 2009), ce qui les rend invisibles pour le signal acoustique. Ils apparaissent lorsque la température atteint un certain niveau.

Les prises de poissons démersaux ont également montré de grandes variations. Tant dans le T0 que dans le T1, la plie (*Pleuronectes platessa*), la limande (*Limanda limanda*) et la solenette (*Buglossidium luteum*) étaient les espèces les plus courantes (Ter Hofstede 2008). Compte tenu de la richesse des espèces, le nombre total d'espèces capturées était nettement plus élevé lors de l'enquête T1 que lors de l'enquête de référence, tant en été qu'en hiver. En été, la richesse moyenne en espèces était également nettement plus élevée. Toutefois, comme cette augmentation a été constatée à la fois dans le parc éolien et dans les trois zones de référence, il est peu probable qu'elle soit due à la construction du parc éolien. La même chose a été constatée pour la capture par unité d'effort pour tous les poissons combinés. Les poissons benthivores (Greenstreet et al 1997), qui se nourrissent d'espèces du benthos, ont dominé les prises en été et en hiver 2003. Pendant l'hiver 2008, la composition des prises a changé de manière significative, avec une augmentation importante des poissons piscivores. Ce changement s'est également produit à la fois dans le parc éolien et dans les zones de référence, et la cause n'a donc pas pu être directement attribuée à la construction du parc.

Des analyses plus détaillées pour les différentes espèces de poissons démersaux ont indiqué un effet possible du parc éolien. Une augmentation significative exclusive à l'intérieur du parc éolien a été constatée pour la sole (*Solea solea*), le merlan (*Merlangius merlangus*) et le rouget rayé (*Mullus surmuletus*) pendant l'été, tandis qu'une diminution significative a été constatée pour la petite vipère (*Echiichthys vipera*), tant en été qu'en hiver. Jusqu'à présent, aucune explication claire ne peut être donnée quant à la raison de cette réaction de ces espèces.

3.4. Marsouins communs

Les résultats acoustiques des mesures T-POD montrent une forte variation saisonnière de l'occurrence des marsouins communs (Scheidat et al 2009, 2011). L'activité d'écholocation était généralement

élevée pendant les mois d'hiver et faible pendant les mois d'été. Le nombre de marsouins communs enregistrés dans T1, à la fois dans le parc éolien et dans les zones de référence, a augmenté par rapport aux chiffres de T0. Tant cette variation saisonnière que l'augmentation globale du nombre de marsouins.

L'abondance a également été constatée dans les observations terrestres des marsouins (Camphuysen 2008).

L'activité d'écholocalisation était similaire dans toutes les zones pendant la période de référence, mais a augmenté de manière significative pendant la période d'exploitation dans la zone du parc éolien. Il a été démontré que les marsouins nageant librement dans la nature émettent presque constamment des vocalises (Akamatsu *et al* 2005, 2007), ce qui signifie que les mesures choisies de l'activité acoustique peuvent être utilisées comme indicateur du nombre de marsouins présents. Les résultats ont montré que l'on trouve relativement plus de marsouins dans la zone du parc éolien par rapport aux deux zones de référence (Scheidat *et al* 2011). Il a été établi que cet effet est réellement lié à la présence du parc éolien. Les explications les plus probables sont l'augmentation de la disponibilité alimentaire due à la faune fixée sur et dans les substrats durs (effet récif) ainsi que l'exclusion des pêcheries et la réduction du trafic maritime dans le parc éolien (effet abri).

3.5. Phoques communs

Les données de télémétrie par satellite indiquent que les phoques ont tendance à éviter les activités de transport maritime, du moins à proximité directe des grandes routes de navigation. En raison de la grande distance entre le parc éolien et les échoueries, les analyses ont été moins concluantes en ce qui concerne les effets possibles des parcs éoliens sur la répartition des phoques. Mais tant avant qu'après la construction, les phoques marqués étendent leur distribution vers la zone d'étude, ce qu'ils ont évité pendant la construction (Brasseur *et al* 2010). Des phoques non marqués ont été observés à l'intérieur du parc éolien opérationnel (Verdaat 2007) et, fin 2010, deux phoques marqués dans le cadre d'un autre programme ont été enregistrés dans l'OWEZ. Bien que des phoques aient été observés dans le parc éolien, des effets mineurs sur le comportement ne peuvent être exclus, comme cela a également été indiqué pour les fermes danoises (Tougaard *et al* 2009).

3.6. Oiseaux locaux

La comparaison des études sur les oiseaux avant et après la construction du parc éolien ne suggère pas d'effets importants sur de nombreuses espèces d'oiseaux étudiées (Leopold *et al* 2009). Les facteurs topographiques tels que la profondeur et le nord semblent être d'une importance capitale, tout comme l'influence des bateaux de pêche sur certaines espèces d'oiseaux. Les données ont montré un bruit considérable, des variations d'une année sur l'autre et des disparités, ce qui a entravé les tentatives de trouver les effets du parc éolien sur les oiseaux locaux. Lorsque l'influence de la topographie générale est supprimée, peu d'indications d'évitement deviennent apparentes. Les macreuses communes (*Melanitta nigra*) semblent éviter le parc éolien, mais leurs densités sont devenues très faibles dans la région en général ces dernières années. Le pic le plus élevé a été observé en 1991-1993, après quoi les effectifs ont diminué, surtout après 2004. Les petits groupes se dirigeant vers la ferme ont toujours réagi fortement en remarquant la ferme et ont changé de cap pour l'éviter (Leopold *et al* 2009). Les fous de Bassan (*Morus bassanus*) et éventuellement les mouettes (*Larus minutus*) semblent éviter le parc éolien, mais le nombre d'observations reste faible et la puissance de modélisation est faible. Contrairement aux observations faites au Danemark (Petersen *et al* 2006), les plongeurs (*Gadidae*), les guillemots (*Uria aalge*) et les petits pingouins (*Alca torda*) n'ont pas montré d'évitement marqué. Une espèce d'oiseaux de mer, le grand cormoran (*Phalacrocorax carbo*), a été

attirée par le parc éolien et utilise le site comme nouvelle plate-forme pour la recherche de nourriture en mer. Ces cormorans sont des oiseaux provenant de deux colonies voisines (dans les dunes du continent), y compris des non-éleveurs sub-adultes. Ils font la navette entre ces colonies et le parc éolien. Ils se nourrissent dans et autour du parc éolien et utilisent les monopiles et le météomât (figure 1) pour sécher leurs plumes, se reposer et socialiser. Le parc éolien est donc un avant-poste offshore des deux colonies sur le continent. À l'exception peut-être des petites mouettes, la plupart des mouettes semblent largement indifférentes à la présence du parc éolien.

3.7. Oiseaux volants

La collecte de données visuelles et radar sur les oiseaux en vol s'est poursuivie jusqu'en mai 2011, et seuls des résultats de base préliminaires sont présentés ici (Krijgsveld *et al* 2010). Ces résultats indiquent que les flux d'oiseaux après la construction du parc éolien étaient considérablement plus faibles que ceux mesurés lors de l'étude de base. Cela n'était pas lié à la présence du parc éolien, mais semble en partie lié à l'emplacement spécifique du parc éolien en mer et en partie au nombre nettement plus faible de bateaux de pêche dans l'étude T1 par rapport à l'étude T0. Les mouettes étaient de loin l'espèce la plus commune observée dans la zone du parc éolien. Tant au printemps qu'à l'automne, les flux ont augmenté en raison de la migration. Le pic mesuré en automne était beaucoup plus élevé que les nombres mesurés au printemps, ce qui pourrait être dû à des altitudes de vol plus élevées au printemps, qui sont supérieures à la portée de détection du radar (Krijgsveld *et al* 2010). Les observations visuelles ont montré une densité d'oiseaux plus faible à l'intérieur du parc éolien qu'à l'extérieur. Les résultats préliminaires indiquent que la déviation s'est produite pendant la journée chez la plupart des espèces qui volent dans la zone du parc éolien. La distance à laquelle la déviation se produit varie de 200 m à plusieurs km. Les premiers résultats indiquent que les oiseaux ont tendance à dévier davantage pendant la nuit. Les goélands, les cormorans et les sternes n'ont pas montré beaucoup d'évitement et ont été régulièrement observés en train de fouiller dans le parc éolien. Les oiseaux de mer pélagiques, tels que les fous de Bassan, les macreuses, les pingouins, les guillemots et les plongeurs, ont montré la plus forte tendance à éviter le parc éolien, et les fous de Bassan ont modifié leur trajectoire de vol plus près du parc (jusqu'à 500 m) par rapport aux autres espèces d'oiseaux de mer (> 2-4 km). Les oiseaux terrestres migrateurs ont parfois montré une forte évation, mais pas toujours. Les oies volant à la hauteur du rotor ont montré de très fortes réactions aux turbines. Lors du vol au-dessus de la hauteur du rotor, aucune espèce n'a enregistré d'évitement. Des volées de passereaux, probablement la majorité des oiseaux migrateurs de la région, ont montré à la fois une déviation autour de l'ensemble du parc éolien et un vol à travers, en évitant les turbines individuelles. Souvent, les oiseaux des espèces qui évitaient entraient dans le parc éolien au niveau d'une turbine à l'arrêt - les densités étaient plus élevées là où l'espacement était plus grand et au niveau des turbines stationnaires.

Les résultats du radar vertical ont enregistré l'activité de vol à toutes les altitudes, la plupart des activités de vol se situant dans la bande d'altitude la plus basse (jusqu'à 70 m), en particulier en hiver, lorsque la plupart des activités proviennent des oiseaux de mer locaux. Les passereaux migrateurs volaient à la fois à très basse altitude (concentrée à moins de 300 m) et à une large gamme d'altitudes jusqu'à la plus haute altitude mesurée (1500 m). Il y avait une nette différence entre la lumière du jour et l'obscurité : les flux étaient plus élevés et les oiseaux volaient plus haut pendant l'obscurité. Le nombre de collisions d'oiseaux n'a pas été enregistré, mais sur la base d'observations visuelles et de calculs de modèles, il est estimé comme étant faible.

4. Discussion

Les principaux impacts prévus de l'établissement d'un parc éolien sont la perturbation de la zone pendant la phase de construction, la présence de la ferme et l'exclusion d'autres utilisations pendant la phase d'exploitation. Dans cette lettre, nous avons mis l'accent sur la phase opérationnelle. Au cours de cette phase, des impacts possibles sont attendus de la présence d'un substrat dur sous la forme de monopiles et de roches de protection contre l'affouillement, du bruit des boîtes d'engrenages, des générateurs et des systèmes hydrauliques, des pales de rotor en rotation et de l'absence de pêche et de grands mouvements maritimes. Nous décrivons d'abord les effets sur les principaux groupes de faune, puis les effets globaux sur l'écosystème (local) dans son ensemble.

4.1. Le benthos

L'absence de pêche et la présence du nouveau substrat dur devaient avoir le plus d'impact sur le benthos. Quelques mois après la construction du parc, la communauté locale du benthos dans la zone sableuse située entre les monopiles ne présentait pas de différences majeures, en termes de composition, de densités, de biomasse globale et de diversité, à l'intérieur de la ferme par rapport à six zones de référence (Daan *et al* 2009). Cela n'indique pas d'effets mesurables clairs à court terme de la construction de l'exploitation. Ces conclusions sont comparables à celles concernant les parcs éoliens danois, où seuls des impacts négligeables sur les communautés indigènes ont été constatés (Leonhard et Pedersen 2006).

Sur les monopiles, cependant, 33 espèces différentes ont été observées et sur la roche de protection contre l'affouillement, 11 à 17 espèces de benthos à substrat dur ont été détectées en 2008. Il s'agit d'un changement significatif et si aucun substrat dur n'était présent dans la zone du parc éolien avant la construction, ces espèces de substrat dur comptent comme une augmentation du nombre d'espèces, augmentant la biodiversité dans la zone du parc, comme cela a été constaté pour les parcs danois (Leonhard et Pedersen 2006), où une augmentation de la disponibilité de la nourriture locale est apparue.

Les espèces sur les monopiles ont été observées dans deux zones clairement distinctes : une zone supérieure dominée par les moules et une zone inférieure dominée par les vers tubicoles et les anémones (Bouma et Lengkeek 2009). Les larves de moules s'attachent facilement aux monopiles et se développent très rapidement dans cette zone. Cette caractéristique pourrait être utilisée à l'avenir pour stimuler une utilisation multiple sous forme d'aquaculture dans les parcs éoliens.

Les espèces présentes sur les rochers de protection contre l'affouillement comprennent des espèces indigènes et introduites, comme l'huître japonaise. On peut affirmer que le substrat dur n'est pas naturel le long de la côte sablonneuse néerlandaise. Mais la carte du bas de l'Atlas Piscatorial publié par Olsen en 1883 montre la présence d'une zone dite de tourbière. De la tourbe grossière a été trouvée dans cette zone avec des restes d'arbres et de branches exposés. Bien que nous ne disposions pas d'autres données, il est probable que de nombreux animaux vivaient sur et dans le dur substrat de ce moorlog. Le substrat dur n'est donc pas nouveau dans cette région, et à part les espèces nouvellement introduites, la présence d'une faune de substrat dur peut être considérée comme plutôt naturelle.

L'étude sur le terrain à la fin de la première année de la phase opérationnelle du parc éolien n'indique pas une augmentation rapide des populations de bivalves dans les ZEEO grâce à un recrutement accru. Comme les expériences en mésocosme ont révélé que les bivalves qui se sédimentent n'ont montré de préférence pour aucune des fractions de sable offertes, rien n'indique que la sédimentation des bivalves sera affectée si la ZEEO, étant fermée à la pêche, devait développer une plus grande variation de la taille des grains de sédiments. L'étude sur le recrutement conclut que

l'OWEZ n'a pas d'effet prépondérant sur le recrutement des bivalves de fond mou pendant la première année de fermeture au chalutage (Bergman *et al* 2010). D'autres facteurs, tels que la mortalité naturelle post-établissement ou un faible approvisionnement en larves, en particulier dans le cas de *Spisula subtruncata*, peuvent jouer un rôle plus important dans le nombre relativement limité de recrues résultant de l'établissement au printemps/été dans la ZEEO. Comme la survie des adultes devrait bénéficier de la fermeture au chalutage, l'augmentation de la population du benthos dépend de l'accumulation d'individus plus âgés (Leonhard et Pedersen 2006), qui n'a pas encore été mesurée dans la ZEEO.

Les analyses de la composition des recrues ont suggéré un gradient au large des côtes mais aucune corrélation claire avec l'emplacement de la ZEO. Cependant, à l'intérieur de la ferme, il y avait une corrélation significative entre l'abondance des bivalves et surtout la teneur en boue. Aucune corrélation de ce type n'a été trouvée en dehors de la ferme et Bergman *et al* (2010) ont suggéré que cela pourrait être un effet de la pêche en dehors de la ferme. Par conséquent, si un effet sur l'écosystème benthique était observé, il ne devait pas être attribué à la présence de la ferme, mais à l'absence de chalutage de fond.

Pour le benthos, il y a des indications que l'absence de pêche a entraîné une corrélation plus explicite entre la boue et le recrutement des bivalves et que le substrat dur conduit à une plus grande biodiversité à l'intérieur du parc éolien.

4.2. Poissons

La présence des monopiles et des pierres de protection contre l'affouillement, ainsi que l'absence de pêcheries, devraient avoir le plus d'impact sur les espèces de poissons. Le bruit et les vibrations des turbogénérateurs et les champs électromagnétiques des câblages ne semblent pas avoir d'impact majeur sur les poissons et les autres organismes mobiles attirés par les substrats de fond durs pour s'alimenter, s'abriter et se protéger (Leonhard et Pedersen 2006). Les données recueillies par les études pélagiques et démersales indiquent une communauté de poissons très dynamique avec de grandes différences entre les prises avant la construction du parc éolien et les prises en phase opérationnelle. La prédominance des espèces pélagiques est passée du hareng au lançon (Ybema *et al* 2009) et la richesse en espèces des poissons démersaux a été sensiblement plus élevée au cours de la première année suivant la construction (Ter Hofstede 2008). Toutefois, comme ces changements ont été constatés à la fois dans le parc éolien et dans les zones de référence, il est peu probable qu'ils soient dus à la présence du parc. Il y a des indications que la grande variabilité temporelle a une relation avec les différences de températures observées.

Au niveau des espèces, il y a eu une augmentation de la sole, du merlan et du rouget rayé et une diminution du moindre weever dans le parc éolien par rapport aux zones de référence. Les résultats sont basés sur l'observation de la zone sableuse à au moins 200 m des monopiles. Pour les parcs éoliens danois, Leonhard et Pedersen (2006) ont estimé que la disponibilité de la nourriture pour les poissons directement autour des sites des turbines a augmenté d'un facteur d'environ 50 après l'introduction du substrat dur, par rapport à l'ancienne zone sableuse. En tenant compte de l'ensemble de la zone des parcs éoliens, ils ont estimé une augmentation d'environ 7 % de la biomasse totale dans la zone, rendant possible une augmentation de la production de poissons liée à la présence du substrat dur. Sur la base des données T1, cette augmentation anticipée ne peut pas être démontrée à partir des données de l'enquête. Des séquences vidéo ont cependant montré que le nouveau substrat dur offre un abri au cabillaud et à la moue, comparable aux observations faites dans les parcs éoliens danois, où l'on a observé la moue et les bancs de cabillaud se nourrissant probablement de crustacés sur la protection contre l'affouillement (Leonhard et Pedersen 2006). Ces observations indiquent une

possible fonction de refuge de la ferme pour certaines espèces de poissons. Dans le cas du cabillaud, cela a été confirmé par les résultats d'un projet parallèle mené dans le parc éolien. Ce projet, destiné à étudier le comportement de chaque type de poisson, a été mené avec la sole et le cabillaud. Il a montré que la sole ne restait pas plus longtemps dans le parc, tandis que certains cabillauds restaient près d'une seule éolienne pendant toute la période de mesure de neuf mois (Winter *et al* 2010).

4.3. Mammifères marins

Des effets possibles sur les mammifères marins sont attendus du fait du bruit généré par les turbines, ainsi que de la présence de sources alimentaires supplémentaires en raison du manque de pêcheries et du nouveau substrat dur avec la faune associée. En ce qui concerne les marsouins, les enregistrements acoustiques montrent que l'activité enregistrée dans le parc éolien opérationnel est nettement supérieure à celle des zones de référence situées en dehors du parc. Scheidat *et al* (2009, 2011) ont indiqué que cela pouvait être lié à une plus grande disponibilité de nourriture ou que les parcs éoliens pouvaient fournir des zones relativement calmes par rapport aux eaux environnantes où l'activité des navires est élevée (ce qu'on appelle l'effet d'abri).

Lors des études menées sur les parcs éoliens danois (Diederichs *et al* 2008), aucune différence n'a pu être détectée en ce qui concerne la présence de marsouins communs entre l'intérieur et l'extérieur du parc éolien. Le seul effet des turbines qui a été observé sur les marsouins communs était une différence dans le cycle de 24 heures des enregistrements des marsouins communs. En 2005 en particulier, un rythme diurne prononcé avec la plupart des enregistrements pendant la nuit s'est produit aux T-POD déployés à proximité des éoliennes individuelles. Diederichs *et al* (2008) suggèrent que cette différence dans le cycle diurne de l'activité des marsouins communs pourrait être liée aux différences diurnes dans la communauté de poissons à proximité des monopiles. Ceci est une indication de l'augmentation du comportement alimentaire des marsouins communs dans les parcs éoliens. Des études néerlandaises et danoises indiquent que les parcs éoliens opérationnels sont fréquemment visités par les marsouins communs et sont très probablement utilisés pour s'alimenter. Il semble que ces parcs éoliens relativement petits n'induisent pas de réactions d'aversion de la part de ces animaux protégés. Un autre parc danois dans la mer Baltique, Nysted, a montré que les marsouins ont quitté la zone après la construction et ne sont pas revenus pendant la phase opérationnelle (Tougaard *et al* 2009). Ces résultats ne peuvent donc pas être facilement extrapolés à un parc éolien.

Lors du battage des pieux, les phoques communs chassés semblaient éviter la zone jusqu'à au moins 40 km de distance. L'effet du parc éolien en fonctionnement sur les phoques n'a pas pu être clairement défini. Dans la période qui a suivi la construction, les phoques marqués ont étendu leur distribution vers la zone du parc éolien (Brasseur *et al* 2010). Cependant, il faudra encore beaucoup de données avant de pouvoir tirer des conclusions définitives concernant les réactions possibles des phoques aux parcs éoliens. Des études danoises (Tougaard *et al* 2006) ont également indiqué que l'utilisation de transmetteurs par satellite ne fournit pas suffisamment de données précises pour établir les effets sur les phoques. Cependant, certains phoques marqués semblent avoir visité le parc éolien, tandis que les observations visuelles des visites de navires n'indiquent aucune différence entre le nombre de phoques à l'intérieur et à l'extérieur du parc. Cela contraste avec la situation de la période de construction, où très peu de phoques ont été observés dans et autour de la zone en raison des niveaux de bruit sous-marin très élevés générés par les opérations de battage des pieux. Tougaard *et al* (2006) concluent que le bruit sous-marin des turbines semble être la seule source potentielle d'impact négatif pour les phoques - mais sur la base des mesures du bruit émis, l'ampleur de cet impact peut être considérée comme marginale. En outre, ils estiment que les phoques pourraient également bénéficier de la disponibilité accrue de nourriture sur les fondations et de la protection contre

l'affouillement. Thomsen *et al* (2006) estiment que le bruit de fonctionnement des éoliennes sera audible pour les marsouins communs à environ 100 m, et pour les phoques communs à plus d'un kilomètre. Jusqu'à présent, seules quelques mesures sonores ont été effectuées dans la ferme OWEZ à des vitesses de vent relativement faibles, indiquant de faibles niveaux de bruit qui ne devraient pas avoir d'influence significative sur les mammifères marins (de Haan *et al* 2007b). D'autres mesures dans d'autres états du vent et de la mer sont toutefois nécessaires avant de pouvoir tirer des conclusions plus définitives.

4.4. Oiseaux

Pour la répartition des oiseaux locaux dans la zone du parc éolien, les facteurs topographiques tels que la profondeur et la latitude ainsi que l'influence des bateaux de pêche sur certaines espèces d'oiseaux semblent être extrêmement importants (Leopold *et al* 2009). Les comptages d'oiseaux effectués par les navires dans et autour du parc éolien ont révélé un comportement d'évitement des macreuses communes et des fous de Bassan, une absence d'évitement marqué des plongeurs, des guillemots, des pingouins et de la plupart des mouettes, ainsi qu'une attraction pour les cormorans. Les observations visuelles et radar du météomast (Krijgsveld *et al* 2010) ont indiqué que les flux d'oiseaux à travers la zone du parc éolien étaient plus faibles par rapport aux comptages effectués avant la construction. Ils ont également trouvé des densités d'oiseaux plus faibles à l'intérieur du parc. Ceci n'était cependant pas lié à la présence du parc éolien, mais semble en partie lié à l'emplacement spécifique du parc éolien au large et en partie au nombre significativement plus faible de bateaux de pêche dans l'étude T1 par rapport à l'étude T0. Les goélands, les cormorans et les sternes n'ont pas évité le parc et l'ont utilisé pour s'alimenter. Mais les fous de Bassan, les macreuses, les pingouins, les guillemots et les plongeurs ont montré un fort comportement d'évitement dans leur trajectoire de vol à proximité du parc. Inger *et al* (2009) ont également conclu que, de manière générale, les parcs éoliens ont un impact négatif sur l'abondance des oiseaux locaux.

En général, les altitudes de vol des oiseaux migrateurs étaient plus élevées à l'intérieur de la ferme qu'à l'extérieur, ce qui démontre très probablement un évitement dans la direction verticale. Jusqu'à présent, les collisions n'ont pas pu être mesurées de manière fiable, mais d'un autre côté, de nombreuses heures d'observations visuelles n'ont permis d'enregistrer aucune collision. Lorsque la visibilité est bonne, tant pour les oiseaux que pour les observateurs, il ne semble pas y avoir de problème. Mais de meilleures techniques doivent être appliquées pour les périodes de mauvaise visibilité, comme les nuits sombres et brumeuses.

Des études danoises ont constaté des effets similaires (Blew *et al* 2008). De fortes proportions d'oiseaux aquatiques (espèces pélagiques, canards de mer, cygnes, oies et autres) évitent les parcs éoliens à grande échelle. D'autres, comme les macreuses, les eiders à duvet, les grands cormorans et les sternes migrateurs, évitent clairement, mais pas totalement, les parcs éoliens offshore. Les espèces résidentes, telles que les mouettes et les cormorans non migrateurs, entrent régulièrement dans le parc éolien, où elles peuvent profiter d'une nouvelle source de nourriture. Petersen et Fox (2007) ont rapporté que lors de trois des quatre enquêtes menées en 2007, plus de macreuses communes ont été enregistrées dans l'empreinte alimentaire du parc éolien que lors de toute enquête précédente. Et bien que les rapports précédents aient indiqué que les macreuses communes étaient affectées par la présence des éoliennes à Horns Rev, l'habituation pourrait avoir lieu après plusieurs années.

En conclusion, plusieurs espèces d'oiseaux semblent éviter le parc éolien, tandis que d'autres sont indifférentes ou même attirées. Tous les résultats indiquent un changement dans l'utilisation de

l'habitat par les oiseaux lorsqu'un parc éolien opérationnel avec des pales de rotor tournantes est présent. Certaines espèces peuvent en bénéficier alors que d'autres évitent la zone. Selon l'emplacement et l'échelle des futurs parcs éoliens, les effets négatifs peuvent augmenter. Par conséquent, des programmes de surveillance à grande échelle sont nécessaires pour établir les effets sur les niveaux de population.

4.5. L'écosystème en général

Bien que l'impact du parc éolien offshore Egmond aan Zee en phase opérationnelle semble relativement faible, il influence la biodiversité locale et le comportement des animaux locaux et migrants. La présence d'un nouveau substrat dur et d'éoliennes en fonctionnement crée un habitat différent par rapport à la situation initiale avant la construction ainsi que par rapport à la zone environnante dans la phase opérationnelle. Les piles et les pierres à récurer agissent comme des récifs artificiels, augmentant ainsi la quantité d'habitat disponible pour certains taxons (Inger *et al* 2009).

Selon l'absence ou la présence antérieure d'un autre substrat dur dans la zone où le parc éolien a été construit, la présence du parc peut entraîner l'installation de nouveaux organismes dans la zone, et donc une plus grande biodiversité. Si d'autres substrats durs étaient présents avant la construction, par exemple des épaves, des plateformes, des récifs (artificiels), etc., on peut difficilement s'attendre à ce que de nouveaux organismes soient introduits dans la zone, mais leur nombre augmentera. Il en va de même pour les espèces envahissantes.

Lors de l'évaluation des effets des parcs éoliens, la variabilité temporelle et spatiale de l'écosystème marin doit être prise en compte. La variabilité temporelle de l'écosystème marin est importante et il y a des changements continus dans la production, la biomasse et la composition des espèces (Lindeboom *et al* 1994). Ces changements peuvent être progressifs, mais il existe également des indications de changements très brusques ou de changements de régime (Beaugrand 2004, van Nes *et al* 2007, Weijerman *et al* 2005). Ces changements de régime semblent être des caractéristiques communes et différentes causes, telles que le forçage hydrométéorologique à grande échelle, les hivers rigoureux, la fréquence élevée des tempêtes, les rétroactions écologiques, les charges en nutriments et les pêcheries, ont été suggérées dans la littérature. Les causes peuvent être naturelles ou anthropiques. Ces changements de régime se produisent également dans la zone côtière néerlandaise, où des changements majeurs ont été observés en 1979 et 1988 (Weijerman *et al* 2005). Les changements de régime semblent se produire à des intervalles d'années ou de décennies et il est probable que des changements seront observés pendant la durée de vie d'un parc éolien. Il est possible que le changement de la dominance des espèces de poissons pélagiques dans les échantillons entre avant et après la construction (Ybema *et al* 2009) soit le résultat d'un changement de température. Ainsi, les effets d'un parc éolien s'ajoutent à un système déjà très variable, et tant les analyses des ensembles de données à long terme que les comparaisons entre la zone d'impact et les zones de référence sont nécessaires pour interpréter les effets possibles des parcs éoliens.

Dans la zone côtière néerlandaise où le parc éolien a été construit, la profondeur est un facteur important pour la répartition spatiale des poissons, des oiseaux et des phoques. La distribution des oiseaux montre une relation particulièrement distincte avec la profondeur (Leopold *et al* 2009). La ZEEO a été construite entre la zone côtière très fréquentée et la mer plus ouverte. Les poissons et les phoques ont une distribution distincte parallèle à la côte (Lindeboom *et al* 2005) et pour de nombreuses espèces, le contour de 20 m de profondeur semble être une division claire entre la distribution côtière et la distribution en haute mer. La ZEEO est située autour de ce contour de profondeur et les effets possibles peuvent être typiques de cette zone distincte. Étant donné que

jusqu'à présent, tous les autres parcs éoliens marins sont prévus en dehors de la zone des 12 milles nautiques, il convient de faire preuve de prudence lors de l'extrapolation des résultats à d'autres zones.

Les principaux effets d'un parc éolien lui-même sont dus au nouveau substrat dur qui augmente la biodiversité et aux pales de rotor en rotation qui peuvent effrayer certaines espèces d'oiseaux. Cependant, d'autres effets majeurs pourraient venir de l'absence d'autres fonctions d'utilisation. Outre la présence d'un certain pilote, dans un écosystème déjà adapté, la nouvelle absence d'un pilote ayant un impact important pourrait créer les changements les plus importants.

Avant sa construction, la zone OWEZ faisait partie de la zone côtière néerlandaise où la pêche est intensive (Piet *et al* 2007) et où les chalutiers à perche ("eurocutters") équipés de moteurs de moins de 221 kW ou 300 CV labourent ou ratissent régulièrement les fonds marins avec leurs chaînes et leurs filets. Cela a très probablement entraîné une diminution de la biodiversité, une composition faunique différente et une structure d'âge différente des populations (Lindeboom et de Groot 1998, Bergman et van Santbrink 2000, Duineveld *et al* 2007, Lindeboom *et al* 2009). L'exclusion des pêcheries peut conduire à la restauration de la faune originale ou de parties de celle-ci. Au cours de la première année suivant la construction, certaines observations de poissons sont venues étayer cette hypothèse, mais d'autres observations, qui sont prévues pour la cinquième année (2011), sont nécessaires pour tirer des conclusions plus fermes.

Au cours de la première année d'exploitation, le parc éolien OWEZ n'a pas eu d'effet sur le recrutement des bivalves à fond mou, ce qui indique qu'on ne peut pas s'attendre à une augmentation rapide des populations de bivalves par un recrutement accru. Les expériences sur le mésocosme n'indiquent pas non plus qu'une plus grande variation des caractéristiques des sédiments générée par la présence d'une OWEZ fermée à la pêche conduira à un meilleur règlement. Toutefois, les résultats suggèrent que le couplage entre les sédiments (boue) et l'abondance des recrues bivalves pourrait être mieux maintenu en l'absence de chalutage dans la ZEEO. Comme l'absence de chalutage devrait favoriser la survie des adultes, l'augmentation de l'abondance du benthos et de la biodiversité sera très probablement causée par l'accumulation d'individus plus âgés. De futures études de terrain prévues en 2011 apporteront des réponses à cette hypothèse.

La zone OWEZ est située près du port d'IJmuiden, à l'entrée du port d'Amsterdam et à proximité de voies de navigation très fréquentées. Il est très probable qu'avant la construction, le bruit sous-marin des navires, y compris des bateaux de pêche, a affecté l'utilisation de la zone par les animaux sensibles à ces bruits, tandis qu'après la construction, les niveaux de bruit ont été réduits par rapport aux niveaux antérieurs ou aux niveaux actuels des environs. La présence éventuelle d'un plus grand nombre de marsouins dans l'exploitation pourrait également être le résultat d'une modification des niveaux de bruit. Pour vérifier cette hypothèse, il faut disposer de cartes acoustiques avant et après la construction.

L'impact réel qu'un parc éolien en fonctionnement aura sur l'écosystème marin dépend largement des caractéristiques locales de cet écosystème avant et après sa construction. Dans les zones où un substrat dur est déjà présent, les pieux ou les pierres auront beaucoup moins d'effets que dans les zones où les sédiments sont presque exclusivement sableux. En outre, selon l'utilisation antérieure de la zone et l'intensité des autres activités humaines et de leurs effets, l'impact local des parcs éoliens peut être très différent. Les résultats obtenus dans une zone ne sont pas nécessairement valables pour d'autres zones. Les conditions de fond seront différentes. Et l'absence d'une fonction d'utilisateur peut entraîner plus d'effets que la présence d'une autre. Dans les zones à forte pression de pêche, comme la zone côtière néerlandaise, l'exclusion des pêcheries aura des effets plus nets que dans les zones moins pêchées, plus au large.

Les effets s'accumulent, et ce que nous observons est toujours le résultat de nombreuses influences ou de la modification de l'intensité de ces influences. Les résultats de cette étude indiquent que la présence du parc éolien OWEZ entraîne une augmentation de la biodiversité locale, peut donner un abri aux organismes benthiques et aux poissons, et modifie légèrement l'utilisation de la zone par les oiseaux. Le fait que l'on considère cela comme positif ou négatif dépend des objectifs écologiques fixés pour la zone. Dans les zones marines protégées où des objectifs sont fixés pour la présence d'espèces d'oiseaux spécifiques, les effets des générateurs de rotation pourraient être considérés comme négatifs. Dans d'autres zones déjà fortement influencées, un parc éolien pourrait conduire à l'amélioration de l'habitat ou même à la restauration de l'environnement (Inger et al 2009).

Crutzen (2002) a introduit le terme d'Anthropocène pour notre époque actuelle. Il n'y a pas de régions sur Terre où l'influence humaine ne peut être mesurée et de nombreux aspects du système terrestre et de son fonctionnement sont influencés ou même dominés par les actions humaines. Il en va de même pour la mer du Nord, où la pression de la pêche intensive, la pollution, l'extraction de sable, de pétrole et de gaz et la navigation ont déjà entraîné une modification de l'écosystème (Lindeboom et al 2009). Aujourd'hui, des parcs éoliens sont en cours de construction, ajoutant un substrat dur et transformant les pales de rotor en une zone marine sablonneuse et ouverte : une nouveauté de l'Anthropocène. Inger et al (2009) affirment que les installations d'énergie marine renouvelable ont le potentiel de produire l'influence anthropique significative sur les écosystèmes marins, et les impacts positifs et négatifs sur l'environnement marin interagiront certainement de manière complexe et imprévisible. Ces impacts peuvent également être cumulés dans le temps et avec l'augmentation du nombre de parcs éoliens. Il est donc essentiel de considérer un écosystème marin plus large plutôt que de se concentrer sur les effets des parcs individuels.

Pour l'avenir, il pourrait être utile de désigner des zones énergétiques spécifiques dans la mer. Nous considérons ici l'impact des parcs éoliens comme faisant partie des effets inévitables de la présence humaine et des demandes énergétiques. Nous pouvons fixer des objectifs clairs pour la production d'énergie souhaitée et des limites pour les impacts potentiels sur l'écosystème, qui se reflètent dans l'emplacement et la conception du parc éolien. Cela offre également des possibilités de planifier l'avenir de la région lors du démantèlement du parc éolien.

5. Conclusions

Les effets du parc éolien OWEZ opérationnel sur les biotes ont été rassemblés dans cette lettre. La communauté du benthos à fond mou n'est pas affectée par le parc éolien, pas plus que le recrutement des bivalves pendant la première année d'exploitation. L'abondance des recrues dans la ferme est corrélée à la teneur en boue. La composition des espèces de recrues dans la ZEEO et les zones de référence environnantes est corrélée avec la teneur en boue des sédiments et la profondeur de l'eau, indépendamment de la présence de la ZEEO. On observe une augmentation de la biodiversité en raison de l'introduction récente de substrats durs des pieux et des pierres. La variabilité temporelle de la communauté de poissons est importante, tant à l'intérieur qu'à l'extérieur du parc éolien, et non pas en raison de sa présence. Certaines espèces de poissons, comme la morue, semblent trouver un abri dans le parc éolien.

Certaines espèces d'oiseaux semblent éviter la ferme, tandis que d'autres sont indifférentes ou même attirées. Il y a des indications claires de l'influence des turbines sur le plan de vol des oiseaux locaux et migrateurs, où plusieurs espèces d'oiseaux ont tendance à éviter les turbines ou l'ensemble de la ferme. Jusqu'à présent, il n'a pas été possible de recueillir des données sur les collisions d'oiseaux.

Pour les phoques, la densité des données est insuffisante pour tirer des conclusions définitives, mais avant et après le battage des pieux, les phoques ont utilisé la zone d'étude. Les marsouins communs n'ont montré aucune aversion pour les parcs éoliens opérationnels. En revanche, il y a des indications que, au moins pendant la période d'étude, les animaux ont utilisé la zone du parc éolien plus fréquemment que les zones de référence.

Dans l'ensemble, la ZEEO agit comme un nouveau type d'habitat avec une plus grande biodiversité d'organismes benthiques, une possible augmentation de l'utilisation de la zone par les poissons, les mammifères marins et certaines espèces d'oiseaux, et une diminution de l'utilisation par plusieurs autres espèces d'oiseaux.

En outre, la construction de parcs éoliens aura également un impact sur d'autres utilisations humaines locales comme la pêche ou la navigation. Une diminution de l'impact de ces utilisations peut également entraîner des changements dans l'écosystème.

Les résultats de ce programme de recherche n'indiquent pas jusqu'à présent la nécessité de changements majeurs dans le développement d'un plus grand nombre de parcs éoliens en pleine mer, bien qu'il faille veiller à éviter les zones sensibles pour les oiseaux. En revanche, ces résultats sont basés sur deux années de recherche et ne s'appliquent qu'à un parc éolien relativement petit, situé à une distance de la côte comprise entre 10 et 18 km. Si des parcs éoliens plus nombreux ou plus grands sont construits dans d'autres endroits, il faut recueillir davantage de données sur les espèces vulnérables.

Un programme de surveillance à grande échelle, associé à un développement adaptatif des futurs parcs éoliens, est recommandé. Un tel programme de surveillance, qui devrait être mis en œuvre avant, pendant et après la construction, devrait non seulement porter sur les quantités et le comportement des organismes vulnérables, mais aussi sur l'intensité et les effets des utilisations humaines autres que l'exploitation des parcs éoliens.

Remerciements

La recherche a été commandée par NoordzeeWind (une entreprise commune de Nuon et Shell Wind Energy). Nous remercions E Dijkman, H Verdaat et we@sea pour la carte et les informations complémentaires.

Références

- Akamatsu T, Teilmann J, Miller L A, Tougaard J, Dietz R, Wang D, Wang K, Siebert U et Naito Y 2007 Comparaison du comportement d'écholocation entre les marsouins côtiers et fluviaux *Recherche en eaux profondes II* **54** 290-7
- Akamatsu T, Wang D, Wang X et Naito Y 2005 Biosonar behaviour of free-ranging porpoises *Proc. R. Soc. B* **272** 797-801
- Beaugrand G 2004 Le changement de régime en mer du Nord : preuves, causes, mécanismes et conséquences *Prog. Oceanogr.* **60** 245-262
- Bergman M, Duineveld G, Van 'T Hof P et Wielsma E 2010 Impact du parc éolien OWEZ sur le recrutement des bivalves *Institut royal néerlandais pour la recherche marine (NIOZ)* Numéro de rapport : OWEZ R 262 T1 20100910 p 80
- Bergman M J N et van Santbrink J W 2000 Mortalité dans les populations benthiques de mégafaune causée par la pêche au chalut sur le plateau continental néerlandais en mer du Nord en 1994 *CIEM J. Mar. Sci.* **57** 1321-32
- Blew J, Hoffman M, Nehls G et Hennig V 2008 Enquête sur le risque de collision avec des oiseaux et les réactions des marsouins communs dans les parcs éoliens offshore Horns Rev, mer du Nord et Nysted, mer Baltique, au Danemark *Partie 1 : Oiseaux. Rapport final* Universit"at Hambourg et BioConsult SH p 165
- Bouma S et Lengkeek W 2009 Développement des communautés de flore et de faune sous-marines sur les substrats durs du parc éolien offshore Egmond aan Zee (OWEZ) *Bureau Waardenburg bv* Numéro de rapport : 08-220 p 46
- Brasseur S, Aarts G, Meesters E, van Polanen-Petel T, Dijkman E, Cremer J et Reijnders P 2010 *Préférences d'habitat des phoques communs dans la zone côtière néerlandaise : analyses et estimation des effets des parcs éoliens offshore* Numéro du rapport : OWEZ_R_252_T1_20100929 p 55
- Camphuysen C J 2008 NZG Marine Mammal Database. Observations de cétacés aux Pays-Bas et dans le sud de la mer du Nord (disponible sur [_http://home.planet.nl// CetaceaAut2007.html](http://home.planet.nl//CetaceaAut2007.html))
- Crutzen P J 2002 Atmospheric Chemistry in the Anthropocene *Challenges of a Changing Earth : Proc. Global Change Open Science Conf. (Amsterdam, juillet 2001)* ed W Steffen, J J"ager, D J Carson et C Bradshaw (Berlin : Springer)
- Daan R, Mulder M et Bergman M J N 2009 Impact du parc éolien OWEZ sur la communauté locale du macrobenthos *Institut royal néerlandais de recherche sur la mer (NIOZ)* Numéro de rapport : OWEZ R 261 T1 20091216 p 77
- Diederichs A, Hennig V et Niels G 2008 Enquête sur le risque de collision d'oiseaux et les réactions des marsouins communs dans les parcs éoliens offshore Horns Rev, mer du Nord et Nysted, Baltique

Mer, au Danemark *Partie II : Marsouins communs* Universit at Hambourg et BioConsult SH, p 99

Duineveld C A, Bergman M J N et Lavaleye M S S 2007 Effets d'une zone fermée à la pêche sur la composition de la faune benthique dans le sud de la mer du Nord *CIEM J. Mar. Sci.* **64** 899-908

Green R H 1979 *Sampling Design and Statistical Methods for Environmental Biologists* (New York : Wiley)

Greenstreet S P R, Bryant A D, Broekhuizen N, Hall S J et

Heath M R 1997 Variation saisonnière de la consommation alimentaire par les poissons de la mer du Nord et implications pour la chaîne alimentaire dynamique *ICES J. Mar. Sci.* **54** 243-66

Grift R E, Tulp I, Ybema M S et Couperus A S 2004 études de la ligne de base des parcs éoliens de la mer du Nord : rapport final poissons pélagiques Numéro de rapport *RIVO* : C047/04 p 77

de Haan D, Burggraaf D, Asjes J et Hille Ris Lambers R 2007a Mesures du bruit de fond pour la ligne de base T0 du MEP-NSW Numéro du rapport *IMARES de Wageningen* : OWEZ R 251 T0 20070323, p 57

de Haan D, Burggraaf D, Ybema S et Hille Ris Lambers R 2007b Underwater sound emissions and effects of the pile driving of the OWEZ windfarm facility near Egmond aan Zee (Tconstruct) *Wageningen IMARES Report number* : OWEZ R 251 Tc 20071029, p 75

Hille Ris Lambers R et Ter Hofstede R 2009 Refugium Effects of le parc éolien MEP-NSW sur les poissons : Rapport d'avancement 2007 *IMARES*, numéro du rapport du RU de *Wageningen* : OWEZ R 264 T1 20091110 (démersales) p 23

Inger R *et al* 2009 énergie marine renouvelable : avantages potentiels pour la biodiversité ? Un appel urgent à la recherche *J. Appl.* **46** 1145-53

Jarvis S, Allen J, Proctor N, Crossfield A, Dawes O, Leighton A, McNeill L et Musk W 2004 parcs éoliens de la mer du Nord : NSW Lot 1 Faune benthique. Institut d'études estuariennes et côtières, Hull, Royaume-Uni. Représentant de l'IECS. ZBB607.2F, 2004 : pp 1-65

Warfield K L, Fine R C, Heunks C, Van Horssen P W, De Fouw J, Collier M, Poot M J M, Beuker D et Dirksen S 2010 Effect studies Offshore Wind Farm Egmond aan Zee, Progress report on flux and behaviour of flying birds covering 2007 & 2008 *Bureau Waardenburg Report* 09-023 Culemborg p 103

Leonhard S B et Pedersen J 2006 Communautés benthiques   Horns Rev avant, pendant et après la construction du *parc éolien offshore de Horns Rev* Numéro du rapport *Vattenfall* : Rapport final/rapport annuel 2005, p 134

Leopold M F, Camphuysen C J, Lieshout S M J, Ter Braak C J F et Dijkman E M 2004 Etude de base des parcs éoliens de la mer du Nord : Lot 5 oiseaux marins dans et autour du futur site Parc éolien proche de la côte (NSW) *Alterra* Numéro de rapport : 1047, p 198

- Leopold M F, Camphuysen C J, Verdaat H, Dijkman E M, Meesters H W G, Aarts G M, Poot M et Fijn R 2009 Local Birds in and around the Offshore Wind Park Egmond aan Zee (OWEZ) (T-0 & T-1) IMARES, Wageningen *UR Report number* : OWEZ R 221 T1 20100329, p 269
- Lindeboom H J, van Raaphorst W, Beukema J J, Cad'ee G C and Swennen C 1994 (Sudden) Changes in the North Sea and Wadden Sea : Les influences océaniques sous-estimées ? *Deutsche Hydrog. Z. Suppl. 2* 87-100
- Tilleul H J, Dijkman E M, Bos O G, Meesters E H, Cremer J S M, De Raad I, Van Hal R et Bosma A 2009 Atlas écologique de la mer du Nord pour la protection des zones *Wageningen IMARES*
- Lindeboom H J et de Groot S J (ed) 1998 The effect of different types of fisheries on the North Sea and Irish Sea benthic ecosystem *NIOZ-rapport 1998-1, RIVO-DLO Report C003/98* : p404
- Lindeboom H J, Geurts Van Kessel J et Berkenbosch L 2005 Zones à valeurs écologiques particulières sur le plateau continental néerlandais *Rapport RIKZ/2005.008*. Rapport *Alterra* numéro 1203
- Olsen O T 1883 *L'Atlas Piscatorial de la mer du Nord, des chenaux anglais et de St. George* (Londres : Taylor et Francis) 50 (cartes)
- Petersen I K, Christensen T K, Kahlert J, Desholm M et Fox A D 2006 Final results of bird studies at offshore wind farms at Nysted and Horns Rev, Denmark. commissioned by DONG energy and Vattenfall A/S *NERI/ministry of environment NERI Report number* : 161
- Petersen I K et Fox A D 2007 Changements dans l'utilisation de l'habitat des oiseaux autour du parc éolien offshore Horns Rev 1, avec un accent particulier sur la macreuse noire. Commandé par Vattenfall A/S *NERI/Ministère de l'environnement* Numéro de rapport : 36
- Piet G J, Quirijns F J, Robinson L et Greenstreet S P R 2007 Indicateurs de pression potentielle pour la pêche, et leurs exigences en matière de données *CIEM J. Mar. Sci.* **64** 110-21
- Pinheiro J C, Bates D M, Debroy S et Sarkar D 2006 nlme : an R package for fitting and comparing Gaussian linear and nonlinear mixed-effects models (disponible sur www.stats.bris.ac.uk/R/)
- R Development Core Team 2009 R : a language and environment for statistical computing. Vienne, Autriche : R Fondation pour l'informatique statistique (voir www.R-project.org)
- Scheidat M et al 2009 Assessment of the Effects of the Offshore Wind Farm Egmond aan Zee (OWEZ) for Harbour Porpoise (comparison T0 and T1) *Wageningen IMARES Report number* : OWEZ R 253 T1 20090829, p 55
- Scheidat M, Tougaard J, Brasseur S, Carstensen J,
- Van Polanen-Petel T, Teilmann J et Reijnders P 2011 Marsouins communs (*Phocoena phocoena*) et parcs éoliens : une étude de cas dans l'environnement néerlandais de la mer du Nord. *Res. Lett.* **6** 025102

- Ter Hofstede R 2008 Effets d'un parc éolien sur la communauté locale de poissons. Une étude comparative des données d'échantillonnage de terrain recueillies avant et après la construction du parc éolien offshore Egmond aan Zee (OWEZ) *IMARES*, numéro de rapport de l'UR de Wageningen : C057/08, p 17
- Thomsen F, Lüdemann K, Kafemann R et Piper W 2006 *Effects of Offshore Wind Farm Noise on Marine Mammals and Fish* (Hambourg : Biola) p 62
- Tien N, Tulp I et Grift R E 2004 Études de base sur le parc éolien pour poissons démersaux *RIKZ* Numéro de rapport : 9M9237 p 37
- Tougaard J, Henriksen O D et Miller L A 2009 Bruit sous-marin de trois types d'éoliennes offshore : estimation des zones d'impact pour les marsouins et les phoques communs *J. Acoust. Soc. Am.* **125** 3766-73
- Tougaard J, Tougaard S, Jensen R C, Jensen T, Teilman J, Adelung D, Liebsch N et Müller G 2006 Phoques communs à Horns Reef avant, pendant et après la construction du parc éolien offshore Horns Rev *Vattenfall A/S* Numéro de rapport : 5, p 67
- Van Deurs M, Van Hal R, Tomczak M T, Jonasd'ottir S H et Dolmer P 2009 Recrutement de lançon *Ammodytes marinus* en relation avec la dépendance de la densité et la composition du zooplancton *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **381** 249-58
- van Nes E H, Amaro T, Scheffer M et Duineveld G C A 2007 Mécanismes possibles pour un changement de régime benthique dans la mer du Nord *MEPS* **330** 39-47
- Communication personnelle Verdaat H 2007
- Weijerman M, Lindeboom H J et Zuur A F 2005 Changements de régime dans les écosystèmes marins du nord-ouest de l'Europe *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **298** 21-39
- Hiver H V, Aarts G et Van Keeken O A 2010 Temps de séjour et comportement de la sole et du cabillaud dans le parc éolien offshore Egmond aan Zee (OWEZ) *IMARES, Wageningen YR* Numéro de rapport : C038/10, p 50
- Wood S N 2006 *Generalised Additive Modelling : Une introduction en R* (Londres : Chapman and Hall)
- Wood S N 2009 mgcv : un paquet R avec des routines pour les MAG et autres régressions de crêtes généralisées avec sélection de paramètres de lissage multiple par GCV ou UBRE/AIC. Egalement GAMMs par REML (disponible sur www.stats.bris.ac.uk/R/)
- Ybema M S, Gloe D et Hille Ris Lambers R 2009 OWEZ-poissons pélagiques : progression après T1 *IMARES Wageningen UR* Numéro de rapport : OWEZ R 264 T1 20091110 (pélagique) p 32
- Zuur A F, Ieno E N et Smith G M 2007 *Analysing Ecological Data* (New York : Springer)

