

## Résumé

Le projet FaCE-IT (Functional biodiversity in a Changing sedimentary Environment: Implications for biogeochemistry and food webs in a managerial setting - Biodiversité Fonctionnelle dans un environnement sédimentaire en évolution: Implications en termes de biogéochimie et de réseaux trophiques dans un contexte de gestion) avait pour objectif principal d'évaluer l'impact des Parcs Eoliens Marins (PEMs) sur des grandes échelles géographiques. La nécessité de renforcer cette connaissance est accrue par le nombre grandissant de PEMs, tandis que notre perception de leurs effets sur l'environnement n'est en général issue que de programmes de surveillance restreints.

En effet, ces programmes de surveillance sont souvent pensés pour évaluer les changements structurels de l'environnement à une échelle locale, et ne s'étendent que sur une durée limitée après l'installation des turbines. Néanmoins, une exploitation durable de l'environnement marin nécessite une compréhension claire des effets combinés d'activités multiples sur les fonctions environnementales, et ce à de grandes échelles géographiques.

Face-It est basé sur une combinaison de campagnes de mesures détaillées dans le voisinage immédiat des parcs éoliens marins, ainsi qu'à plus grande échelle le long de gradient sédimentologiques. Ces données, complétées par des expériences en laboratoire visant certains aspects spécifiques des cycles du carbone et de l'azote, ont fourni l'information nécessaire pour permettre la considération d'échelles spatiales étendue à l'aide d'un nouveau modèle océanographique, développé dans le cadre de ce projet.

Les observations détaillées obtenues dans le voisinage des turbines ont montré que les différences structurelles entre communautés associées à différentes régions des PEMs se reflétaient en termes fonctionnels. Les plus basses complexités trophiques furent trouvées au sein de zones dominées par des organismes suspensivores (la zone intertidale, et la zone sous-jacente dominée par *Mytilus*), tandis que les plus grandes complexités trophiques furent observées dans la zone d'accumulation de la matière organique. Ainsi, les fondations (ou plus précisément, les structures de protection anti-affoulement) sont les zones artificielles montrant le plus haut niveau de complexité trophique. Telles que conçues actuellement, ces fondations offrent non seulement un abri et une disponibilité accrue de nourriture, mais aussi une plus grande diversité de ces ressources trophiques. Il apparaît donc qu'une reconception de ces fondations à des fins écologiques puisse servir comme un outil de restauration environnementale.

Il ressort de nos observations que les populations de maquereaux (une espèce halieutique pélagique) utilisent les PEMs comme zones d'alimentation de manière opportuniste. De plus, nous sommes en mesure de confirmer les résultats préalables indiquant que deux espèces de poissons benthopélagiques (les tacauds et les jeunes cabillauds) utilisent les PEMs pour s'approvisionner lors de périodes prolongées. Nos résultats nous permettent aussi d'ajouter l'espèce benthique des chabousseaux à épines courtes à cette catégorie. Ces résultats indiquent que la restriction des activités de pêche au sein des PEMs ne permet qu'à certaines espèces de bénéficier d'un abri et de zone d'alimentation, ce qui pourrait mener à un accroissement local de la production halieutique.

Une première procédure d'extension spatiale fut réalisée lors d'expérience d'impulsions destinées à estimer l'effet de grande densité de suspensivores en amas localisés dans les PEMs. Nos estimations montrent que, pour l'ensembles des turbines présentes dans la zone Belge de la Mer du Nord, les organismes dominants (l'amphipode *Jassa herdmani*, et la moule *Mytilus Edulis*)

ingèrent un total de 657 tonnes de carbone organique par an, ce qui correspond à 1.3 % de la production primaire réalisé dans l'enceinte de PEMs Belges. Si l'effet sur le domaine pélagique peut sembler minime, des travaux subséquents (voir plus bas) montrent que cela a des conséquences importantes pour l'écosystème benthique.

Afin d'améliorer notre compréhension du fonctionnement de l'écosystème benthique, nous avons réalisé des incubations en laboratoire pour quantifier les taux de transferts biogéochimiques et les relier aux propriétés physiques et biologiques du sédiment. Ces expériences ont été réalisées dans les environs de la même turbine ayant servi aux recherches sur les réseaux trophiques, et le long de gradients sédimentologiques entre sédiments fins et plus grossiers, pour faciliter les travaux d'extension spatiale subséquents. Pour mener ces expériences à bien, des nouvelles méthodes ont été développées, permettant une mesure continue de la bio-irrigation, et une manipulation contrôlée de la perméabilité du sédiment, deux variables essentielles de la recherche sédimentologique en Belgique. Pour la première fois, nous avons démontré l'importance de la DNRA (réduction dissimilation du nitrate en ammonium) dans le cycle benthique de l'azote dans la zone Belge de la Mer du Nord, en particulier dans les zones bien irriguées et pauvres en matière organique, où l'azote n'est pas soustrait du sédiment mais renvoyé vers la colonne d'eau sous forme d'ammonium assimilable. La perméabilité a été identifiée comme une variable essentielle pour expliquer les processus biogéochimiques et devrait être reconnue en tant que variable environnementale standard lors de recherches futures

En se basant sur ces études biogéochimiques et sur des jeux de données supplémentaires, nous avons évalué l'adéquation d'indices fonctionnels permettant de couvrir la composante "fonctionnement de l'écosystème" lors d'évaluations environnementales effectuées dans le cadre des directives Européennes MSFD (Marine Strategy Framework Directive) et HB (Habitat Directive). Trois familles d'indices furent considérées. 1) Une première série d'indices sont basés sur l'expression de traits caractérisant le comportement d'organismes occupant la surface benthique, qui résultent en un déplacement de particules (bioturbation) et de substances dissoutes (bioirrigation). Ces aspects sont respectivement décrits par le Potentiel Communautaire de Bioturbation (BPC), et le Potentiel Communautaire de Bioirrigation (IPC). Nos résultats suggèrent que le BPC constitue dès aujourd'hui un indice adéquat, permettant de caractériser les fonctionnements biogéochimiques dans les environnements ad-hoc. Par contre le IPC nécessite quelques ajustements avant de pouvoir être utilisé en tant qu'indicateur standard dans le cadre des directives Européennes. 2) Une deuxième famille d'indices portant sur la biodiversité fonctionnelle porte sur l'entièreté de l'espace fonctionnel occupé par une communauté. Nos résultats indiquent que deux indices (la richesse fonctionnelle, *Fric*, et l'uniformité fonctionnelle, *Feve*) sont prometteurs, mais nécessitent d'identifier les seuils caractérisant un bon statut. 3) Enfin, nous avons évalué des indices issus de l'Imagerie de Profils Sédimentaires (SPI) et avons conclu que l'indice de Qualité de l'Habitat Benthique peut s'avérer utile, après quelques légères modifications.

Nos travaux d'extension spatiale, visant à évaluer l'impact de multiple PEMs sur de grandes échelles géographiques, ont été rendus possibles par le développement d'un modèle spécifique et par l'intégration dans ce modèle des données et résultats expérimentaux précités. Si la présence des PEMs a un effet limité sur le domaine pélagique, cet effet est considérable sur le domaine benthique. Nos modèles ont montré que le dépôt de matière organique est augmenté au sein des PEMs jusqu'à 50% localement, et entre 2 et 15% dans un voisinage proche (2 km). Au-delà de ce voisinage, le dépôt de matière organique est diminué. Cette diminution est plus petite en amplitude que l'augmentation au sein des PEMs, mais s'étend sur une zone considérablement plus grande. Il apparaît donc clairement que l'impact des PEMs doit être considéré comme

transfrontalier: les projets Français de déploiement de PEMs affectent les eaux Belges, tout comme les projets Belges affectent les eaux Hollandaises.

L'augmentation locale du dépôt de matière organique a des conséquences sur la répartition des processus de reminéralisation benthique. La reminéralisation totale augmente (dans les zones où le dépôt est accru), et se traduit généralement par une forte augmentation de la reminéralisation anoxique, mais aussi, dans une moindre mesure, par une augmentation de la reminéralisation oxygène. Il en résulte une accumulation accrue de carbone organique dans les PEMs. Au cours de leur exploitation, les 10 cm supérieurs de la couche sédimentaire dans les PEMs existants peuvent stocker 28700 tonnes de carbone, un chiffre qui atteint les 48400 tonnes si l'on considère les nouveaux projets de construction de PEMs. Cette quantité correspond à 0.014-0.025 % des émissions totales de CO<sub>2</sub> en Belgique. L'accumulation de carbone organique dans les sédiments des PEMs induit donc une contribution faible, mais significative, aux réductions d'émission de CO<sub>2</sub>.

Ces modèles permettent également d'aider à l'allocation de parcelles pour de nouveaux projets éoliens dans les eaux territoriales Belges. En effet, les nouvelles concessions (allouées dans le cadre du dernier plan d'aménagement) se superposent aux zones marines protégées des Vlaamse Banken, où des gravières font l'objet de protections particulières dans le cadre de la directive Habitat. Nos modèles ont montré que des impacts négatifs sur ces gravières peuvent être évités en plaçant les turbines à une distance d'au moins 3 à 7 km des gravières, respectivement en amont ou en aval des courants résiduels dominants, ou de 2 à 4 kilomètres dans la direction perpendiculaire à ces courants.

En plus de sa production scientifique (3 thèses de doctorat, 13 publications évaluées par les pairs, 25 posters et présentations lors de conférences scientifiques) le projet Face-It fut producteur de valeur ajoutée à de nombreux égards. L'étroite coordination du projet a participé à la mise sur pied d'une puissante communauté Belge de recherche sur les PEMs, au départ de laquelle au moins 4 nouveaux projets de recherches ont depuis été financés. Face-It a permis la création de nouveaux outils et protocoles, mis à disposition de la communauté scientifique Belge et internationale et a contribué à la promotion d'une future génération de scientifiques au travers de deux écoles d'été et de formations pour étudiants de masters lors de campagnes de mesures annuelles. Les membres scientifiques de Face-It ont aussi été impliqués activement dans la gestion politique du patrimoine marin, notamment au travers de recommandations concernant l'installation de nouveaux PEMs et par le partage de connaissance et d'expertise sur le contexte écologique des PEMs. L'intégration active de parties prenantes dans le projet a nettement amélioré sa production scientifique, résultant en l'évaluation de scénarios réalistes au moyen du modèle intégré final de Face-It concernant les effets des PEMs sur la dynamique du carbone dans les écosystèmes marins