

Quantifying the cOntribUTion of Fouling fauna to the Local carbon budget of an Offshore Wind farm

RÉSUMÉ EXÉCUTIF

1. Contexte et justification

Les parcs éoliens en mer (PEM) se développent rapidement dans les eaux européennes dans le cadre de la transition vers des systèmes énergétiques à faibles émissions de carbone. À mesure que leur capacité augmente, ces structures influencent de plus en plus les écosystèmes marins aux échelles locale et régionale. Les fondations des turbines introduisent de vastes surfaces de substrats durs dans des environnements dominés par des sédiments meubles et sont rapidement colonisées par des communautés de biofouling denses, dominées par des organismes filtreurs. Ces communautés filtrent de grands volumes d'eau pour se nourrir et libèrent des quantités significatives de pelotes fécales. Ce processus modifie le flux des particules, la composition des sédiments et les cycles biogéochimiques autour des turbines. Bien que des études antérieures aient mis en évidence une augmentation de la matière organique et des changements de composition faunistique près des turbines, l'ampleur, les mécanismes et la signification écologique de ces effets restaient insuffisamment quantifiés. Le projet OUTFLOW a donc été initié pour fournir une évaluation intégrée de l'influence des organismes de biofouling sur le cycle du carbone à plusieurs échelles spatiales au sein et autour des PEM situés dans la partie belge de la mer du Nord (PBMN).

2. Objectifs du projet

L'objectif du projet était de quantifier la contribution de la faune de biofouling au budget local et régional de carbone des parcs éoliens en mer. Pour ce faire, OUTFLOW a défini cinq objectifs majeurs. Premièrement, développer et appliquer des méthodologies permettant de distinguer et de quantifier les contributions relatives de différentes sources de matière organique dans l'environnement marin. Deuxièmement, déterminer si les pelotes fécales produites par les communautés de biofouling sont intégrées dans les réseaux trophiques benthiques. Troisièmement, décrire les processus de minéralisation biogéochimique se déroulant dans les sédiments autour des turbines, en particulier dans les sédiments perméables typiques de la PBMN. Quatrièmement, caractériser l'empreinte carbone d'une turbine individuelle et quantifier la quantité de carbone stockée et recyclée dans son environnement immédiat. Enfin, un changement d'échelle a été effectué de façon à extrapoler les observations locales vers les échelles du parc à éoliennes et de la région en utilisant des outils de modélisation hydrodynamique et biogéochimique avancés.

3. Approche méthodologique

Pour répondre à ces objectifs, OUTFLOW a employé une approche interdisciplinaire combinant observations de terrain, analyses en laboratoire, modélisation des réseaux trophiques et simulations hydrodynamique et biogéochimique multi-échelles. Les campagnes de terrain ont impliqué un échantillonnage haute résolution des sédiments autour des fondations des turbines, le long de transects situés entre 7 et 75 mètres de la couche d'enrochement, incluant la collecte de nutriments interstitiels, de données granulométriques, de carbone organique, de pigments et d'échantillons pour analyses isotopiques. Des campagnes d'échantillonnage de la colonne d'eau ont fourni des informations détaillées sur la matière particulaire en suspension, la chlorophylle *a* et les conditions

environnementales dans différents régimes de courant, dans la zone transfrontalière de PEM à la frontière entre les parties belge et néerlandaise de la mer du Nord. Les analyses en laboratoire ont inclus l'utilisation d'isotopes stables et de signatures en acides aminés spécifiques pour identifier la contribution de la matière organique dérivée de pelotes fécales aux pools de matière organique de la colonne d'eau. La structure du réseau trophique et les flux de carbone ont été reconstruits à l'aide d'un cadre de modélisation inverse linéaire, permettant des comparaisons entre communautés naturelles des sédiments grossiers, fins, et celles des PEM. La modélisation hydrodynamique et biogéochimique a été réalisée à l'aide du modèle COHERENS en considérant des grilles imbriquées, avec des résolutions spatiales allant jusqu'à 10 mètres pour simuler la dispersion et la déposition des pelotes fécales et des détritiques planctoniques, ainsi que des simulations régionales à 500 mètres pour analyser les effets des PEM sur la production primaire, les flux particuliers et le carbone benthique.

4. Principaux résultats scientifiques

4.1 Effets des parcs éoliens en mer sur la structure des réseaux trophiques

Le réseau trophique des PEM présentait la richesse spécifique la plus élevée parmi les habitats étudiés, mais aussi la biomasse faunistique totale la plus faible. Cette biomasse réduite était largement due à l'absence de l'oursin détritivore *Echinocardium cordatum*, un contributeur majeur de biomasse dans les sédiments de référence. Bien que le réseau trophique des PEM contienne beaucoup plus de liens trophiques que les systèmes de sédiments grossiers ou fins, ces liens étaient généralement faibles. La connectance et les indices de recyclage étaient plus faibles dans le PEM que dans les réseaux de référence, suggérant un système moins mature et potentiellement moins stable. Les espèces de substrat dur, bien que couvrant une très faible proportion de la surface totale, jouaient un rôle disproportionné dans l'absorption du carbone : elles contribuaient à environ un quart de l'absorption du carbone de la colonne d'eau dans le réseau trophique des PEM, créant une voie trophique distincte liant la production pélagique à la déposition benthique via le biofouling.

4.2 Production et déposition des pelotes fécales

Les organismes de biofouling tels que la moule *Mytilus edulis*, l'amphipode *Jassa hermani* et l'anémone plumeuse *Metridium senile* produisaient des quantités importantes de pelotes fécales, *Mytilus edulis* étant le principal contributeur. Ces pelotes étaient rapidement exportées vers le fond marin, où elles contribuaient à un enrichissement organique mesurable près des fondations. Cependant, leur déposition était fortement influencée par les courants de marée, la dynamique de sillage et la variabilité spatiale des flux, entraînant des schémas d'accumulation complexes. Bien que les pelotes fécales constituent une source nouvelle et traçable de carbone dans les sédiments, leur contribution restait faible par rapport à celle des phytodétritus naturels, qui dominaient les apports totaux en carbone organique d'un facteur trois à dix-huit. Néanmoins, la déposition de pelotes fécales représente une voie fonctionnellement importante, car elle transporte rapidement et efficacement de la matière organique vers le fond.

4.3 Biogéochimie des sédiments et dynamique de minéralisation

Les sédiments au sein du PEM sont demeurés majoritairement perméables, ce qui a favorisé le transport advectif rapide de l'eau interstitielle et limité le potentiel de séquestration à long terme du carbone. Bien qu'une augmentation locale du carbone organique total atteignant près de 9 % par rapport aux valeurs de fond ait été observée, ce carbone n'était pas séquestré durablement. La minéralisation se produisait efficacement en raison des conditions de fond hautement énergétiques et de la structure perméable des sédiments. La modélisation de la minéralisation a montré que la composition de la matière organique déposée — en particulier la proportion de pelotes fécales par

rapport au matériel d'origine planctonique — influençait fortement les taux de dégradation. Globalement, la présence des turbines augmentait la déposition de carbone à court terme, mais n'entraînait pas un stockage substantiel à long terme.

4.4 Processus dans la colonne d'eau

Les observations dans la colonne d'eau ont montré que la matière particulaire en suspension et les concentrations de chlorophylle étaient principalement déterminées par l'hydrodynamique régionale, notamment l'influence du panache de l'Escaut et l'advection tidale. Bien qu'un certain renforcement du mélange et de la remise en suspension des particules soit survenu dans la zone des PEM, les effets induits par les PEM étaient relativement mineurs comparés à la variabilité environnementale naturelle. L'alternance des flux vers le nord et vers le sud généraient de forts gradients spatiaux et temporels expliquant une grande partie de la variabilité observée. Cela souligne que les impacts des PEM sur les propriétés de la colonne d'eau restent faibles à l'échelle régionale.

4.5 Extrapolation à l'échelle régionale et impacts écosystémiques

L'extrapolation des observations à l'échelle régionale à l'aide de la modélisation a révélé que, bien que les impacts des PEM soient clairement observables localement, ils deviennent modestes lorsqu'ils sont répartis sur de larges domaines spatiaux. Les simulations ont montré une réduction de la biomasse phytoplanctonique dans un rayon d'environ sept kilomètres autour des PEM, due à la filtration par la faune de biofouling. Toutefois, un anneau de biomasse phytoplanctonique légèrement accrue apparaissait plus loin, stimulé par la libération de nutriments issus de l'excrétion des organismes de biofouling. La déposition des pelotes fécales était principalement confinée à l'empreinte du PEM, mais s'étendait jusqu'à dix kilomètres le long de l'axe tidal principal. Les changements dans les stocks de carbone benthique étaient plus faibles que les changements dans les flux de déposition, car la minéralisation rapide empêchait une accumulation significative à long terme. En résumé, bien que les PEM modifient fortement les voies du carbone et le fonctionnement benthique à leur proximité immédiate, leur influence sur les processus écosystémiques régionaux reste relativement faible.

5. Conclusions

Le projet OUTFLOW constitue la première évaluation intégrée, validée par le terrain et soutenue par la modélisation, de l'influence de la faune de biofouling sur la dynamique du carbone dans et autour des parcs éoliens en mer dans la partie belge de la mer du Nord. Le projet démontre que les communautés de biofouling créent de nouvelles voies trophiques acheminant la production de la colonne d'eau vers le fond marin, entraînant des augmentations localisées de matière organique benthique et des modifications mesurables de la structure des réseaux trophiques. Toutefois, la nature perméable des sédiments et l'environnement hydrodynamique dynamique limitent fortement le stockage de carbone à long terme. Bien que les PEM induisent des effets écologiques et biogéochimiques nets à l'échelle de la turbine et du parc, leurs effets régionaux plus larges demeurent modestes. Les résultats soulignent l'importance de prendre en compte à la fois les propriétés physiques des sédiments et les processus hydrodynamiques lors de l'évaluation du potentiel des PEM à influencer le cycle du carbone ou à contribuer au stockage de carbone.

6. Recommandations

Le projet recommande d'élargir l'échantillonnage autour des fondations des turbines pour inclure des gradients plus longs, plusieurs axes par rapport au flux tidal et différents types de fondations. Des travaux supplémentaires sont nécessaires pour affiner les modèles hydrodynamiques en intégrant les

tourbillons locaux, la dynamique détaillée des sillages et les interactions entre turbines. Les gains ou pertes de biomasse au niveau de chaque turbine devraient être explicitement pris en compte dans les analyses de montée en échelle. Enfin, une surveillance continue de la colonne d'eau à l'aide de systèmes automatisés fournirait des données essentielles tout au long de l'année pour compléter les campagnes d'échantillonnage de courte durée.

Mots-clés : parc éolien offshore, cycle du carbone, réseau trophique, mer du Nord, Extrapolation à l'échelle régionale