

L'INSA Rouen Normandie, implantée au sein de la Métropole Rouen Normandie, propose dix formations d'ingénieurs en région Normandie. Parmi elles, la formation ingénieure Génie Civil et Urbain, a ouvert ses portes en 2008 sur le campus du Havre. En convention avec l'Université Le Havre Normandie, elle s'étend sur 3 ans à l'issue d'un premier cycle INSA ou d'un bac +2. Elle regroupe une trentaine d'élèves par promotion et accueille, depuis 2020, un double cursus Architecte-Ingénieur. Par des enseignements scientifiques théoriques et pratiques, des projets et des enseignements d'humanité, elle forme les futurs ingénieurs au pilotage, à la conception, la réalisation, l'exploitation ou encore la gestion d'ouvrages et d'infrastructures diverses. La présente contribution a été formalisée par des étudiants de 4^{ème} année en double diplôme Ingénieur Génie Civil et Architecture, dans le cadre d'un projet pédagogique axé sur le montage et le pilotage d'une opération d'aménagement.

Contact :

Département Génie Civil & Urbain
INSA Rouen Normandie

Adresse : 77 rue Bellot
76600 Le Havre

Tél : 03 32 95 99 50

Mail : ai4@insa-rouen.fr

Le point de vue de l'INSA Rouen Normandie sur les impacts de l'anthropisation du littoral, en particulier de l'éolien en mer, sur les écosystèmes

EN BREF. La modification de la façade maritime par l'implantation d'éoliennes induit une modification des écosystèmes et des activités humaines dans le secteur concerné. Ces modifications sont premièrement dépendantes du type d'éolienne implanté : elles sont plus ou moins profondes, plus ou moins larges et nécessitent des interventions en phase chantier impactant plus ou moins l'écosystème en place. En effet, la façade Manche Est Mer du Nord (MEMN) est un habitat naturel notamment pour les phoques ou encore différentes espèces d'oiseaux comme les fulmars boréal et mouettes tridactyle, listés rouge par l'UICN (Union Internationale pour la Conservation de la Nature), que l'implantation des éoliennes peut faire fuir de la zone, et à terme potentiellement disparaître. La présence des aires marines protégées telles que Natura 2000 Oiseaux et Habitats ou d'un parc naturel marin, démontre la nécessité sans pour autant d'obligation, de faire de ces écosystèmes une priorité dans les réflexions. L'implantation d'éoliennes par leurs fondations crée un chamboulement dans l'écosystème et bien que l'effet « réserve » démontre que cette modification n'est pas synonyme de régression, il faut noter la durée de vie limitée d'une éolienne et donc la destruction périodique de ces réserves. Il convient également de remarquer que les phases de chantier et de démantèlement présentent, elles, plusieurs risques de pollution, notamment par les carburants utilisés par les bateaux, ou encore le rejet potentiel de microplastiques détruisant des formes de vie animales et végétales. Une réflexion est alors à porter, dans une dynamique d'énergie plus durable, sur toutes les méthodes de mise en œuvre et d'exploitation de ces dispositifs, pour éviter une contradiction entre une volonté durable et des méthodes destructives.



Ecosystèmes de la façade MEMN

La mer, qui représente le plus vaste espace naturel de la planète, héberge une biodiversité abondante et diversifiée, soulignant ainsi l'importance cruciale de sa protection.

La façade Manche Est-Mer du Nord est dotée de faibles profondeurs et d'habitats variés (estuaires, baies, hauts-fonds rocheux...) favorisant la diversité d'organismes marins et créant des environnements uniques à préserver. Sur cette façade, plus de 250 espèces ont été dénombrées dont certaines présentent une importance patrimoniale notable en raison de leur rareté.

Cette grande diversité d'habitats favorise également une abondance d'oiseaux marins, en particulier pendant les périodes de migrations. Les falaises côtières offrent des emplacements prisés pour le repos et la nidification des oiseaux marins, faisant de cette façade un site majeur pour la reproduction de différentes espèces. Les espèces les plus présentes sur cette façade maritime sont le fulmar boréal, la mouette tridactyle et le goéland argenté. Enfin, certaines espèces d'oiseaux côtiers tels que les gravelots fréquentent régulièrement le littoral. Ces derniers, avec le fulmar boréal et la mouette tridactyle sont des espèces classées rares liste rouge par l'UICN. La Liste rouge de l'UICN représente la compilation la plus exhaustive au niveau mondial de l'évaluation de l'état de conservation global des espèces végétales et animales. Il est donc essentiel de garantir la conservation de ces espèces, susceptibles d'être affectées par l'installation d'éoliennes en mer.



Figure 1- Fulmar Boréal

Source : Andreas Trepte, www.avi-fauna.info.

La présence de mammifères marins est également importante sur ce territoire. En effet, divers cétacés tels que le grand dauphin et le marsouin commun sont fréquents. De plus, les zones côtières et les bancs de sables sont régulièrement occupés par les phoques (phoques veau-marins et phoques gris).



Figure 2- Phoque veau marin

Source : lepal.com

Ces zones peuvent être affectées par la construction et l'exploitation de parcs éoliens en mer, perturbant potentiellement les habitats essentiels de reproduction, d'alimentation et de repos des phoques.

En outre, d'importants herbiers de zostères marines créent des prairies sous-marines, offrant à la fois des zones nutritives pour de nombreuses espèces de poissons mais aussi des zones de reproduction et de nurserie. Il en est de même pour les bancs de Maerl, composés d'algues rouges calcaires.

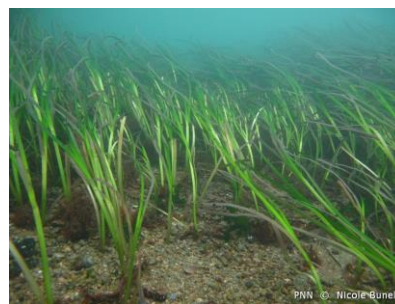


Figure 3- Zostères marines

Source : reseau-manchemerdu nord.n2000.fr

Un aspect distinctif de la côte d'Opale est le « fleuve marin côtier », une formation de courants marins littoraux résultant de la rencontre entre les eaux marines et continentales, entraînant le déplacement des larves des espèces marines vers le nord et favorisant la formation de plancton essentiel à la chaîne alimentaire. Enfin, en raison de sa production significative de plancton et de la présence d'estuaires et de baies, cette façade abrite une multitude d'espèces marines cruciales pour la pêche, telles que la seiche, le hareng, les coquilles Saint-Jacques et la sole.

Pour préserver au maximum ces écosystèmes en place, plusieurs zones de vigilances sont mises en place comme, sur notre secteur, les Aire Marines protégées. Ces zones sont définies par différentes instances, et en l'occurrence, des zones Natura 2000 à l'échelle de l'Union Européenne, des parc naturels marins et des réserves naturelles nationales à l'échelle française sont présentes sur notre site d'étude (de proposition d'implantation de parc éolien). Ces zones n'étant cependant pas de zones de protection forte (ZPF), il n'y a donc pas de moyen d'évaluation ni de contrôle, et le respect des écosystèmes en place tient donc grandement à la volonté des meneurs de projets.

Un enjeu majeur de la Gestion Intégrée des Zones Côtières (GIZC) sur la façade Manche Est Mer du Nord (MEMN) est de parvenir à faire coexister les formes d'anthropisation tout en préservant les écosystèmes maritimes et terrestres présents. Les formes d'anthropisation en zones côtières sont multiples : activités portuaires, extraction de granulats, transport maritime, câbles sous-marins, loisirs nautiques et plaisance, énergies marines renouvelables. Une forme d'anthropisation consiste en l'installation de parcs éoliens en mer, qui constitue à la fois une piste pour atteindre la neutralité carbone en 2050, et une source de préoccupations quant à son impact sur les écosystèmes locaux.

Impacts de l'éolien en mer en phase d'exploitation sur les écosystèmes

Les éoliennes offshore, composées de pâles, d'un générateur, d'une nacelle et d'un mât, sont maintenues en place grâce à leurs fondations (pour les éoliennes posées) ou bien par ancrage (pour les éoliennes flottantes). Quelle que soit la technique employée, elle est susceptible de remuer les fonds marins, ainsi que la faune et la flore présentes en profondeur. La mer sur la façade MEMN étant relativement peu profonde (inférieure à 100m), donc accessible, on peut supposer qu'un parc éolien flottant ne soit pas nécessaire. Pour un parc éolien posé, il existe plusieurs types de fondation : gravitaire, monopieu, caisson à succion et jacket. En Europe, le monopieu est largement utilisé : il représente 80% des fondations installées en 2022. Il est constitué d'un simple tube en acier de très grand diamètre (10m pour une turbine de 15MW) enfoncé dans le sol de manière à compenser les efforts causés par la houle et le vent. Le recours majoritaire au monopieu s'explique par sa simplicité de production et sa compatibilité avec un grand nombre de sols. Cependant ce type de fondation apparaît comme l'un des plus invasifs, étant donné ses dimensions et son introduction profonde dans le sol, pouvant être source de vibrations en phase de construction. Cela dit, en phase d'exploitation, les fondations et d'éventuelles liaisons sous-marines non enfouies, peuvent provoquer un effet « réserve ». Elles forment alors un nouvel habitat pour les espèces ayant besoin d'un support pour se fixer et attirer de nouveaux prédateurs (poissons, oiseaux, ...).

Cet effet sur la biodiversité a été constaté sur les parcs existants en mer déjà implantés en Europe (en particulier ceux installés depuis les années 1990-2000 au Danemark, en Belgique...). Le parc éolien aurait alors un effet bénéfique pour la biodiversité localement mais aussi dans les zones adjacentes au parc, où l'on observerait un simple changement d'état du milieu marin. Cependant, il est intéressant de noter qu'il est difficile de contrôler l'arrivée de nouvelles espèces dont certaines pourraient être invasives, ainsi que le départ des espèces sur place à l'origine.

A contrario, cet effet « réserve » représente un nouveau risque pour l'avifaune. Le parc éolien peut faire effet barrière et pousser les oiseaux à rallonger leurs vols, ce qui peut exercer une influence sur le comportement des espèces locales lorsqu'elles cherchent à se nourrir ou des oiseaux migrateurs. L'impact sur l'avifaune va majoritairement dépendre de la disposition et de la taille du parc par rapport aux populations d'oiseaux et il va surtout être important lors des périodes de reproduction. Cependant l'augmentation du stock de proies, la présence de nouveaux perchoirs ou encore la photo-attraction sont des facteurs qui peuvent attirer l'avifaune, mais qui sont aussi des facteurs pouvant augmenter le risque de collision avec les éoliennes (même si celui-ci reste faible)

Aussi, cet effet « réserve » n'est que temporaire puisque les éoliennes ont une durée d'utilisation limitée, de l'ordre de 30 ans. L'habitat

qu'elles constituent serait donc bouleversé régulièrement.

Pendant leur fonctionnement, les rotors et les pâles génèrent des sons constants, transmis par les mâts des éoliennes sous la surface de la mer, d'un niveau sonore de l'ordre de 150 décibels pour des fréquences comprises entre 5 et 10 000 Hertz. La sensibilité des espèces marines à ces vibrations est variable mais à prendre en compte dans la réalisation d'un projet de parc éolien, car susceptible d'altérer leur comportement. Aussi les sons émis lors de l'exploitation d'un parc éolien sont bien moindres qu'en phase d'installation.

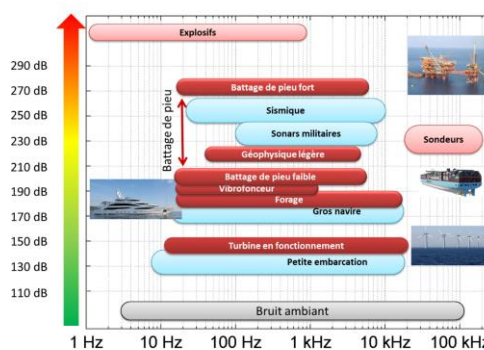


Figure 4 : Caractéristiques des sources sonores des projets de fermes éoliennes offshore (en rouge) comparées à celles d'autres émissions sonores humaines (en bleu) et au bruit ambiant naturel (en gris). Source : A.Jolivet, B.Kinda, D. Mathias, société Somme Pépinière d'entreprises Créatic, *Synthèse des connaissances de la communauté scientifique sur l'impact acoustique des projets éoliens offshore sur la faune marine*, juillet 2015

L'exploitation du parc éolien nécessite l'utilisation de postes électriques ainsi que la mise en place de liaisons électriques sous-marines et terrestres. Les impacts permanents potentiels sur la biodiversité sont liés au changement d'habitat (qui peut induire un effet réserve comme sur les fondations des éoliennes), aux champs électriques et magnétiques ainsi que la température. Ces sujets sont alors à surveiller, mais ils ne présentent pas de risques trop importants pour les écosystèmes. Par exemple, les espèces marines les plus sensibles (les élasmobranches) aux champs électromagnétiques vivent plutôt proches de la surface loin de la portée du champ.

Nous avons pu voir que la présence d'un parc éolien dans le milieu marin sur la façade MEMN peut avoir un impact bénéfique sur la biodiversité locale mais nécessite une vigilance sur certains aspects. Nous allons maintenant nous intéresser aux phases de construction et de démantèlement des éoliennes, qui sont les étapes les plus impactantes sur la biodiversité.

Impacts de l'éolien en mer en phase de construction et de maintenance sur les écosystèmes

La phase d'installation et les opérations de maintenance d'un parc éolien font partie des étapes dans la vie d'une éolienne qui affectent le plus les espèces marines. Les travaux entraînent un risque de pollution et donc une baisse de la qualité de l'eau, la présence d'engins et de navires pour les travaux peuvent perturber les espèces locales (bruits, lumières, risques de collision).

Un des travaux les plus impactant est lors de l'enfouissement des pieux par battage ou lors du forage, le bruit généré (entre 170 à 270 dB cf image ci-dessus) peut entraîner des perturbations de comportements des espèces locales, par exemple, les phoques dépendent de leur ouïe pour chasser et communiquer. Plusieurs mesures peuvent limiter les risques acoustiques. Tout d'abord, l'utilisation de rideaux de bulles lors de la mise en place des pieux atténue les nuisances sonores. Il est nécessaire de ne pas faire de travaux lors des périodes sensibles comme la mise-bas ou la reproduction, en particulier pour les espèces à intérêt de protection. Aussi, le niveau de bruit peut être augmenté progressivement pour permettre aux espèces de fuir et de ne pas se blesser.

Ces perturbations acoustiques concernent principalement l'éolien posé en fondation monopieu. Il existe d'autres techniques comme la fondation Jacket (utilisée à Saint-Brieuc) ou la fondation gravitaire (utilisée à Fécamp) qui possède un impact moins important.

La mise en place des liaisons sous-marines et des postes électriques demande les mêmes mesures de prévention que pour la pose des éoliennes. Mais, une attention particulière est à porter sur le cheminement adopté pour mettre en place le câble, afin que celui-ci ne détruise pas des écosystèmes à protéger. La manière d'implanter ces câbles (par ensouillage, par enrochement ou par l'utilisation de matelas en béton) doit aussi être analysée en fonction du lieu afin d'avoir les conséquences sur l'environnement les plus faibles.

Un point de vigilance est à soulever à propos de la gestion des déchets sur le chantier. Il est nécessaire de mettre en place des mesures efficaces de surveillance pour éviter et limiter le rejet de déchets, microplastiques, hydrocarbures et autres pollutions dans la mer. Par exemple, pour chaque action sur le chantier : organiser et penser la récupération des déchets, limiter le nombre d'engins sur la zone (pour limiter le rejet d'hydrocarbures) ... Ce point de vigilance est aussi valable pour le démantèlement des parcs éoliens.

Les parcs éoliens en mer possèdent une espérance de vie limitée (estimée à 30 ans). Or cette énergie renouvelable n'est mise en place que depuis peu de temps en Europe. Nous commençons seulement à avoir les premiers retours sur l'expérience des démantèlements (Danemark, Suède). Pour un démantèlement, le

développeur éolien peut être contraint de retirer entièrement les fondations ou seulement une partie. Certaines parties comme le pieu ou le système de raccordement peuvent être laissées enfouies pour éviter de creuser les fonds marins. Cette méthode peut permettre d'éviter en partie l'impact sur les écosystèmes présents. Même s'il est crucial de rappeler que le plus grand impact sera dû au démantèlement des fondations sur lesquelles les écosystèmes marins se seront implantés pendant toute la durée de vie des éoliennes. De plus, l'opération de démantèlement pourrait avoir des effets négatifs similaires à ceux de la phase d'installation. Le bouleversement de l'écosystème marin pourrait être conséquent. **Penser en amont la gestion du démantèlement est alors primordiale.**

Une des solutions possibles pour éviter l'impact d'un démantèlement peut être la réutilisation du parc éolien : le repowering offshore ou le renouvellement des éoliennes en mer en cours d'exploitation. Il s'agit de remplacer les turbines ou des éléments des éoliennes par des modèles plus récents et plus puissants, tout en conservant les fondations, les pieux et les câbles électriques. Cette technique existe pour les éoliennes terrestres, mais elle n'est pas encore appliquée pour les éoliennes en mer. Cette technologie permettrait de prolonger la durée de vie des parcs éoliens, d'éviter de reconstruire des infrastructures et donc de mieux préserver les écosystèmes marins tout en continuant l'exploitation d'une énergie durable.

Conclusion :

- L'impact de l'éolien offshore sur les écosystèmes de la façade MEMN sont non négligeables et des mesures de protection de cet environnement doivent être mise en place tout au long de la vie du parc.
- Les phases d'installation, de maintenance et de démantèlement sont les étapes les plus cruciales dans la vie du parc pour la préservation du milieu marin, et doivent donc faire l'objet d'une attention particulière.
- L'un des domaines dans lequel il serait intéressant d'approfondir l'innovation serait le repowering offshore, qui permettrait de prolonger la durée de vie des parcs éoliens sans pour autant compromettre la faune et la flore s'y étant développées.
- Aussi, si l'objectif de cette forme de production d'énergie est d'être plus durable et renouvelable, il serait intéressant de s'attarder sur l'innovation des matériaux (fibre naturelle) composant les éoliennes ainsi que leurs fondations.

