

L'éolien extracôtier au Canada : portrait des enjeux et des opportunités



NERGICA

Recherche et
innovation en énergies
renouvelables

L'éolien extracôtier au Canada : portrait des enjeux et des opportunités

Auteurs

Marc Defossez, Ph. D.

Alexandra Gellé, Ph. D.

Denis Lapalme, Ph. D.

Amjad Maadeni, CPI

Ferial Amira Slim, M. Sc.

Révision technique et stratégique

Karim Belmokhtar, Ph. D., CPI

Frédéric Côté, MBA

Jessica Thérroux

Mai 2023

Collaborateurs

Dominic Bolduc, ing., M. Sc. A.
Arnaud Fortier-Morissette

Révision linguistique

Benoît Brière
Ferial Amira Slim, M.Sc.

Traduction

David Soares

Conception graphique

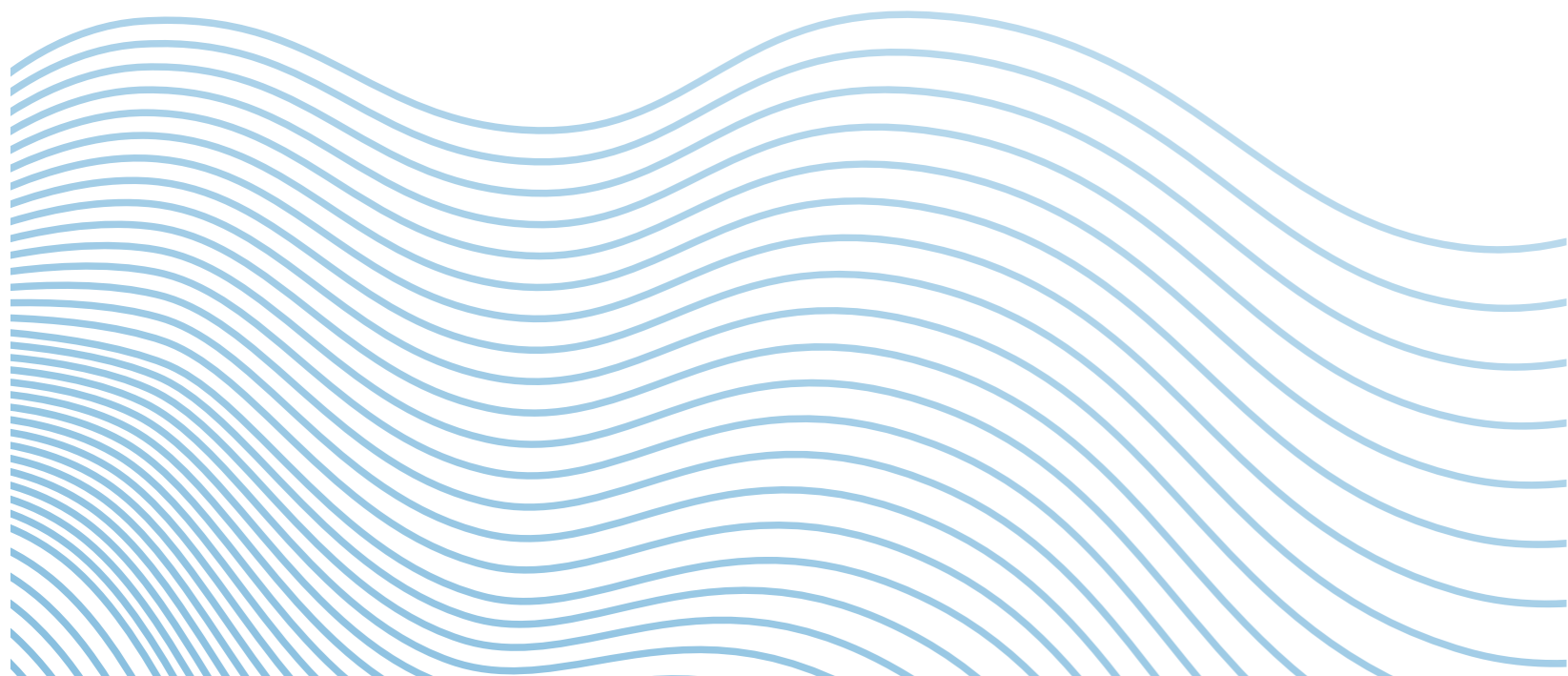
Marilou Levasseur

Les auteurs tiennent à remercier toutes les personnes ayant contribué directement ou indirectement à cette étude. Ce document est la responsabilité exclusive de ses auteurs et ne reflète pas nécessairement la position de l'un ou l'autre des éditeurs ou collaborateurs.

© 2023 Nergica – Tous droits réservés

Table des matières

Liste des tableaux.....	VII
Liste des figures.....	VIII
Glossaire	VIII
Sommaire.....	XII
1. Contexte	1
2. Les bases de l'éolien extracôtier	5
2.1 Les technologies d'installation.....	5
2.1.1 Particularités des éoliennes en mer.....	5
2.1.2 Les fondations fixes.....	6
2.1.3 Les plateformes flottantes.....	10
2.1.4 Normes IEC de construction.....	15
2.2 Les conditions propres au milieu marin.....	15
2.2.1 Le vent.....	15
2.2.2 L'environnement marin.....	16
2.2.3 Cas du climat froid.....	17
2.2.4 Rôle de la côte.....	18
2.3 Comparaison avec les éoliennes terrestres.....	19
3. Les impacts environnementaux et socioéconomiques	23
3.1 Impact sur l'environnement.....	23
3.1.1 Introduction.....	23
3.1.2 Impact sur la faune marine.....	24
3.1.3 Impact sur le milieu naturel.....	26
3.1.4 Émissions GES de cycle de vie.....	27
3.2 Impact sur les activités socioéconomiques.....	28
3.2.1 Impact sur la pêche commerciale.....	29
3.2.2 Impact sur le tourisme et le transport maritime.....	30
3.3 Aspects réglementaires de l'éolien extracôtier.....	31
3.3.1 Contraintes et restrictions.....	31
3.3.2 Cadre réglementaire au Canada.....	31



4. Portrait international	37
4.1 État actuel de l'industrie	37
4.2 Parcs dans le monde	41
Tahkoluoto wind farm – Parc en mer givrante [54], [130]	41
Hywind – parc ayant des conditions similaires au golfe du Saint-Laurent [28], [131]	42
Vineyard Wind Farm – premier parc commercial prévu en Amérique du Nord [132], [133]	42
4.3 Coûts	43
4.3.1 Évolution des coûts	43
4.3.2 Le soutien des États	44
4.3.3 Cas des parcs éoliens flottants	52
5. Potentiel de l'éolien extracôtier au Canada	55
5.1 Potentiel éolien	55
5.1.1 Dans l'Atlantique	55
5.1.2 Dans le Pacifique	57
5.1.3 Dans les Grands Lacs	60
5.2 Les acteurs de l'industrie éolienne extracôtière	61
6. Conclusion, perspectives et recommandations	65
Références	70
Annexes	87

Liste des tableaux

Tableau 1. Caractéristiques des plateformes flottantes comparées aux fondations fixes pour l'installation d'EMF	10
Tableau 2. Avantages et inconvénients des éoliennes en mer comparées aux éoliennes terrestres	20
Tableau 3. Part de marché des manufacturiers d'éoliennes en mer	39
Tableau 4. Plus récent modèle d'éolienne en mer annoncé par les principaux manufacturiers	40
Tableau 5. Objectifs de puissance de l'éolien extracôtier dans divers pays	45

Liste des figures

Figure 1. Les cinq types de fondations fixes d'éolienne en mer [15].....	6
Figure 2. Les trois principaux types de plateformes flottantes [37].....	11
Figure 3. Énergie moyenne annuelle du vent à 80 m de hauteur [44].	15
Figure 4. Distribution des capacités de production d'électricité en fonction de la distance à la côte et de la profondeur [55].....	18
Figure 5. Comparaison des tailles et puissances des éoliennes sur terre et en mer [56].....	19
Figure 6. Impacts environnementaux les plus fréquemment rapportés [72].....	24
Figure 7. Comparaison des impacts de plusieurs sources d'électricité sur les écosystèmes [76]..	25
Figure 8. Zone de sillage marin autour des fondations marines [10].....	27
Figure 9. Émissions GES de cycle de vie des différentes technologies de production de l'électricité [76].....	28
Figure 10. Cartes des biorégions marines du Canada montrant les AMP en cours d'élaboration [117].....	33
Figure 11. Puissance de l'éolien extracôtier installée au 1 ^{er} janvier 2022. Gauche : totale; droite : en 2021 uniquement (p. 109 de [119]).....	38
Figure 12. Comparaison dans le temps des CADE de plusieurs technologies de production d'électricité [134].....	43
Figure 13. Évolution attendue du CADE d'ici 2050.....	44
Figure 14. Évolution de la puissance installée de l'éolien extracôtier au Royaume-Uni et de sa part de la production totale d'électricité [161].....	48
Figure 15. Aires marines protégées [194] (A) et zones d'importance écologique et biologique [195] (B) de l'océan Atlantique canadien	56
Figure 16. Aires marines protégées [194] (A) et zones d'importance écologique et biologique [195] (B) de l'océan Pacifique canadien.....	59

Glossaire

Éolien extracôtier

Fait référence à l'utilisation de la force éolienne pour la production de l'électricité au moyen d'éoliennes installées sur une vaste étendue d'eau (océan, mer, grand lac) afin de capter l'énergie des vents marins, qui sont plus forts et plus réguliers que les vents terrestres.

Éolien terrestre

Fait référence à l'utilisation de la force éolienne pour la production de l'électricité au moyen d'éoliennes installées sur terre ferme.

Câble de transmission sous-marin

Câble électrique sous-marin permettant de transporter l'électricité des éoliennes. Les plus petits câbles venant des éoliennes sont généralement connectés à un plus gros câble qui, lui, rejoint la côte. Ce plus gros câble est souvent enfoui dans les sédiments ou installé dans une tranchée recouverte. Des câbles de transmission de courant continu à haute tension (*High-Voltage Direct Current* en anglais), qui nécessitent une sous-station en mer, sont utilisés pour rejoindre la côte quand le parc est à plus de 50 km en mer.

Gisement éolien

Quantité théorique d'énergie électrique qui peut être produite par les vents soufflant sur un territoire donné.

Coût actualisé de l'énergie (*Levelized Cost of Energy, LCOE*)

Désigne le coût d'une unité d'énergie. Correspond au coût total de la construction et de l'opération des éoliennes par rapport à la quantité totale d'électricité qu'elles produiront durant toute leur vie.

Dépenses d'investissement (*Capital Expenditure, CAPEX*)

Coût total des achats de biens et de services nécessaires pour installer et mettre en service un parc éolien.

Contrat d'approvisionnement en électricité (ou contrat d'achat d'électricité) (*CAE*) (*Power Purchase Agreement, PPA*)

Accords financiers entre un acheteur d'énergie et un producteur d'énergie. Les CAE sont des contrats à long terme dont la durée peut atteindre de 10 à 30 ans.

Tarif de rachat garanti (*feed-in tariff, FiT*)

Contrat d'approvisionnement en électricité qui fixe le volume et le prix de vente de l'électricité produite par le parc éolien pour plusieurs années.

Complément de rémunération (*feed-in premium*, FiP)

Contrat d'approvisionnement en électricité qui verse un complément, fixe ou variable, au prix de vente obtenu sur le marché.

Contrat sur différence (*contract for difference*, CfD)

Contrat d'approvisionnement en électricité par lequel l'acheteur et le producteur d'énergie s'entendent pour se payer la différence entre le prix négocié entre eux et le prix du marché. Quand le prix de vente sur le marché est inférieur à ce prix négocié, l'acheteur verse la différence sous la forme d'un complément de rémunération. Au contraire, le producteur verse la différence à l'acheteur quand le prix de vente est supérieur au prix négocié.

Sous-station

La sous-station contient l'ensemble des équipements électriques nécessaires pour collecter l'électricité produite par un ensemble d'éoliennes et la préparer pour la transmission vers le réseau électrique. Pour les parcs très éloignés des côtes, une première sous-station en mer collecte et transmet l'électricité à une sous-station sur terre qui, elle, adapte la tension à celle du réseau électrique.

Fondation fixe

L'éolienne est installée sur une structure rigide qui est fixée directement dans le fond marin. Cette structure ne bouge pas, peu importe les conditions de la mer (courant, vagues, marée).

Plateforme flottante

La structure qui supporte l'éolienne flotte à la surface de l'eau. Sa position peut bouger selon les conditions de la mer. Son mouvement est limité par un système d'amarres et d'ancrages.

Plateau continental

Continuation de la côte, en suivant la même pente, sous le niveau de la mer. La profondeur du plateau continental augmente à mesure qu'on s'éloigne de la côte, jusqu'à atteindre entre 100 et 200 m. Sa largeur peut aller d'une dizaine à plusieurs centaines de kilomètres selon les régions. Le plateau continental se termine brusquement, et laisse place à des eaux de plusieurs centaines de mètres de profondeur.

Climat froid

Région qui est affectée soit par des températures froides (moyenne annuelle inférieure à 0 °C, ou 9 jours atteignant -20°C), soit par l'accumulation récurrente de givre ou de neige sur les structures.

Fond marin

Désigne, de façon large, la croûte terrestre sous l'étendue d'eau ainsi que toutes les couches de sédiments marins.

Sédiment marin

Dépôt de particules insolubles sur la croûte terrestre sous l'étendue d'eau. Ces sédiments sont de matières, de formes, de densité et d'épaisseur qui changent en fonction des régions.

Bathymétrie

Mesure de la profondeur des fonds marins. Les cartes bathymétriques indiquent la profondeur de l'eau par rapport au niveau normal de la mer.

Organismes benthiques ou benthos

Ensemble des espèces marines vivant à proximité du fond marin.

Planification spatiale marine

Processus de concertation rassemblant tous les utilisateurs d'une zone marine afin de coordonner une utilisation durable et bien partagée des ressources présentes dans la zone.

Aire marine protégée (AMP)

Une aire marine protégée (aussi appelée zone de protection marine) est une zone qui est légalement protégée et gérée pour assurer la conservation à long terme de la nature.

Zone d'importance écologique et biologique (ZIEB)

Zone océanique qui a été identifiée comme ayant une importance biologique ou écologique particulière.

Puissance installée

La puissance électrique installée représente la capacité de production électrique nominale dans des conditions de fonctionnement standard. Son unité de base est le watt (W). La production d'une éolienne ou d'un parc éolien est le plus souvent exprimée en mégawatts (1 MW équivaut à 1 million de watts). Pour un très grand parc, ou à l'échelle d'un pays, elle est exprimée en gigawatts (1 GW égale 1 milliard de watts).

Potentiel éolien technique

Quantité théorique d'énergie éolienne disponible dans une zone donnée. Cette quantité peut être brute et tenir compte uniquement de la force des vents, ou elle peut être plus raffinée et tenir compte aussi des limites technologiques (actuelles ou futures), du terrain ou encore des usages concurrents du territoire dans la zone.

Énergie éolienne

Désigne l'énergie produite par une éolienne ou un parc d'éoliennes en transformant la force du vent en électricité au cours d'une période donnée. Elle est habituellement exprimée en kilowattheures (kWh) ou mégawattheures (MWh) par jour ou par année.

Sommaire

Compte tenu de l'objectif d'atteindre la carboneutralité au Canada d'ici 2050, il est nécessaire d'explorer attentivement toutes les options de production d'énergie propre afin de répondre aux besoins énergétiques conséquents du pays. En effet, selon une étude réalisée par le laboratoire national des énergies renouvelables américain (NREL), pour atteindre cet objectif de carboneutralité, le Canada a besoin de 150 GW de puissance installée en matière d'énergie éolienne alors qu'elle est seulement de 14,3 GW présentement. Pour répondre à cette demande, il est donc important d'explorer différentes options comme l'énergie éolienne extracôtère, adoptée par de nombreux pays à travers le monde. Actuellement, le Canada n'exploite aucun parc éolien extracôtier, et ce, malgré un gisement éolien important le long des façades atlantique et pacifique, ou encore dans les Grands Lacs.

Une option énergétique à considérer avec ses avantages et ses défis

L'énergie éolienne extracôtère désigne la production d'électricité à partir de la force des vents marins en utilisant des éoliennes installées en dehors des zones côtières, généralement en mer ou en haute mer. En comparaison de l'éolien terrestre, l'éolien extracôtier présente certains avantages tels que des conditions de vent plus favorables (vents plus forts et plus stables), ce qui augmente son potentiel de production d'énergie. En outre, les turbines éoliennes marines ne diffèrent pas beaucoup des terrestres, si ce n'est qu'elles sont généralement plus puissantes. Cependant, les parcs éoliens extracôtiers peuvent également présenter des défis importants, par exemple des coûts de développement élevés et des impacts environnementaux potentiels sur les écosystèmes marins. Ces mêmes parcs peuvent aussi avoir un impact positif en créant des récifs artificiels propices à certaines espèces marines.

L'éolien extracôtier en plein essor mondial

L'éolien extracôtier est donc une option qui mérite une attention particulière. Ce secteur est en forte croissance à travers le monde et de nombreux pays exploitent déjà cette énergie. Les États-Unis ont annoncé un important développement éolien extracôtier le long de la côte atlantique, tandis que la Nouvelle-Écosse a déclaré son intention de développer 5 GW d'éolien extracôtier d'ici 2030. À cet égard, plusieurs entreprises canadiennes du secteur ont déjà manifesté leur intérêt pour participer à ces projets d'envergure et sont actuellement en train de se positionner sur le marché. Les prévisions suggèrent aussi que ce marché continuera de se développer à un rythme rapide dans les années à venir. Les prévisions suggèrent aussi que ce marché continuera de se développer à un rythme rapide dans les années à venir. En effet, selon le rapport Wind Electricity 2022 de l'Agence internationale de l'énergie (AIE), l'industrie éolienne extracôtère a fourni environ 22% de la croissance totale de la capacité éolienne de 94 GW en 2021, soit le plus haut total de l'histoire et trois fois la moyenne des cinq années précédentes. En revanche, les prévisions indiquent un volume stable d'installations d'éoliennes terrestres, tandis que les systèmes éoliens extracôtiers devraient connaître une accélération supplémentaire dans leurs marchés actuels.

Un moteur de développement économique pour le Québec et le Canada

Le secteur de l'éolien extracôtier, auquel des entreprises canadiennes et québécoises participent déjà activement (services maritimes, entreprises de fabrication et d'ingénierie, etc.), peut présenter un potentiel considérable de croissance et d'exportation pour le Québec et le Canada. Les activités menées par les entreprises locales dans ce domaine contribuent déjà à renforcer la présence du pays sur la scène internationale et peuvent devenir un moteur de développement économique à long terme. En effet, en explorant les opportunités d'expansion du secteur de l'éolien extracôtier, le Québec et le Canada peuvent profiter d'un avantage compétitif sur le marché mondial de l'énergie renouvelable et renforcer leur rôle en tant que leaders dans ce domaine. Il faudrait pour cela que le Canada adapte un cadre réglementaire régissant les projets de parcs éoliens extracôtiers.

Cette solution est à considérer particulièrement pour les provinces de l'Atlantique, dont les besoins de décarbonation sont importants et auxquels les ressources disponibles, telles que l'hydroélectricité, ne peuvent répondre. Cela est particulièrement vrai pour Terre-Neuve-et-Labrador, où le potentiel solaire est relativement limité comparé à celui du Québec ou de l'Ontario. L'énergie éolienne, y compris extracôtère, offre ainsi une solution de rechange pour assurer un meilleur approvisionnement énergétique à ces régions.

En conclusion, l'éolien extracôtier représente une opportunité majeure pour le Canada d'atteindre ses objectifs de réduction de gaz à effet de serre et de décarbonation de son économie. À cet égard, le Canada bénéficie d'un atout considérable, car il possède une expertise avérée dans des domaines connexes tels que la construction navale, la technologie de l'énergie éolienne terrestre et la gestion de grands projets d'infrastructures. En combinant ces compétences avec un environnement réglementaire favorable et un engagement fort en faveur du développement du secteur, le Canada est en mesure de devenir un acteur majeur dans le domaine de l'énergie éolienne extracôtère.





1. Contexte

Au cours des dernières décennies, la prise de conscience environnementale et la volonté de réduire la dépendance aux énergies fossiles ont entraîné un développement massif des énergies renouvelables. L'apparition de l'éolien extracôtier a donc été impulsée essentiellement par la nécessité de répondre à la croissance de la demande énergétique et aux objectifs environnementaux de décarbonation de l'économie.

L'évolution de l'éolien extracôtier à travers le monde

Les premiers projets éoliens extracôtiers ont été développés en Europe, notamment au Danemark, en Allemagne et au Royaume-Uni. Au fil des ans, le secteur de l'éolien extracôtier a connu une croissance rapide, avec de nouveaux projets en mer développés dans des pays tels que la France, l'Espagne, les Pays-Bas et la Belgique. L'industrie de l'éolien extracôtier a également attiré l'attention des gouvernements d'Asie et d'Amérique du Nord, qui voient dans ce secteur une opportunité d'atteindre leurs propres objectifs en matière de décarbonation de l'économie.

La Chine, en tant que plus grand consommateur d'énergie du monde et pour répondre à ses besoins de production, a adopté l'éolien extracôtier, d'une part grâce à un plateau continental propice à l'installation de turbines éoliennes, et d'autre part grâce à la proximité des sites des grandes villes qui permettent une distribution efficace de l'énergie produite.

Selon le rapport de l'AIE, en 2021, sur les 830 GW de puissance éolienne installée, 93 % provenaient des parcs terrestres, tandis que 7 % étaient extracôtiers [1]. L'éolien extracôtier est encore en développement, mais l'intérêt grandissant que lui accordent les gouvernements ainsi que l'industrie a pour conséquence une amélioration constante de la technologie, une baisse des coûts et une augmentation de la puissance énergétique par éolienne. Aujourd'hui, l'éolien extracôtier est considéré comme l'un des moyens les plus prometteurs d'atteindre les objectifs de décarbonation de l'économie au niveau mondial.

Le Canada : un acteur majeur dans l'éolien terrestre, des opportunités à saisir en mer

Le Canada, quant à lui, est déjà bien engagé dans la production d'électricité d'origine éolienne avec 14,3 GW de puissance installée et il dispose encore d'un grand potentiel pour développer de nouveaux parcs éoliens terrestres. Cependant, à ce jour, le Canada ne possède aucun parc éolien extracôtier. À noter qu'il existe des freins au développement de l'éolien extracôtier au Canada : d'une part, c'est une électricité qui est actuellement plus chère que celle produite sur terre, et d'autre part l'installation d'un parc éolien extracôtier se heurte à des contraintes réglementaires qui peuvent différer d'une province à l'autre.

Le potentiel prometteur de l'éolien extracôtier au Canada

Néanmoins, la diversification des sources d'énergie est une stratégie importante pour minimiser les risques liés à une dépendance excessive à une source d'énergie et pour assurer un approvisionnement stable, surtout si l'on considère les instabilités géopolitiques récentes.

Par conséquent, pour maintenir son indépendance énergétique, tout en réduisant l'impact des changements climatiques qui constituent une source supplémentaire d'instabilité géopolitique, le Canada doit accélérer le développement de projets d'énergie renouvelable, comme l'énergie éolienne sur terre et en mer. Le potentiel du gisement canadien en matière d'énergie éolienne extracôtière et les nombreux avantages de cette dernière sont donc à considérer, particulièrement avec l'objectif d'atteindre la carboneutralité en 2050. En effet, selon une étude réalisée par le laboratoire national des énergies renouvelables américain (NREL), le Canada doit installer environ 150 GW pour atteindre ses objectifs d'électrification de l'économie [2].

En raison de sa situation géographique privilégiée, le Canada possède un grand nombre de sites adaptés à la construction d'installations éoliennes en mer : une façade maritime conséquente qui lui offre un ensemble de plateaux continentaux répartis le long des océans Atlantique et Pacifique, ainsi que la région des Grands Lacs. Il dispose également d'une filière éolienne solide capable de développer de nouveaux projets de parcs éoliens en mer. De plus, le Canada peut compter sur une main-d'œuvre qualifiée capable de répondre aux différents besoins au moyen de l'innovation afin de mieux prendre en considération les spécificités locales comme le climat froid.

Les progrès technologiques constants font que le coût élevé de l'électricité produite en mer par rapport à celle produite sur terre est un contrargument de moins en moins défendable. De plus, les parcs éoliens extracôtiers sont situés à proximité des côtes, ce qui les rend également proches des grandes métropoles et, par conséquent, des consommateurs; c'est aussi le cas des Grands Lacs, avec des villes comme Toronto. Tout cela fait de l'éolien extracôtier un sérieux atout dans la transition énergétique au Canada, qui a des objectifs ambitieux en matière de réduction de son empreinte carbone. C'est la raison pour laquelle des projets commencent à voir le jour [3]–[6]. Cet intérêt croissant se voit aussi au vu de publications récentes sur le sujet [7], [8].

Une approche pancanadienne de l'éolien extracôtier

Le présent mémoire se démarque des publications antérieures par son caractère pancanadien et parce qu'il aborde les différentes dimensions de l'éolien extracôtier (technique, technologique, réglementaire, etc.). Pour faciliter la lecture du texte et parce que la zone totale des plateaux atlantique et pacifique canadiens excède largement celle disponible dans les Grands Lacs, on fera référence à l'éolien extracôtier dans tout le document (sauf dans le paragraphe 5.3 qui traitera explicitement des Grands Lacs). Le but de ce travail est de présenter un état des lieux de l'éolien extracôtier au Canada afin d'éclairer les décideurs dans leurs choix d'investissement à venir.

Dans ce qui suit, les bases de l'éolien extracôtier seront exposées en même temps que ce qui distingue ce secteur de l'éolien terrestre, afin de familiariser le lecteur avec les termes et concepts employés dans ce secteur. Puis les questions environnementales seront abordées sans omettre les aspects réglementaires. Un portrait sommaire de la situation internationale de l'éolien extracôtier sera présenté, pour mieux faire comprendre aussi bien les moteurs que les freins à son développement. Par la suite, une exploration des différentes opportunités de développement de l'éolien extracôtier au Canada sera réalisée. Enfin, des recommandations seront données à l'adresse des décideurs.





2. Les bases de l'éolien extracôtier

Bien que les éoliennes en mer soient souvent deux fois plus puissantes que les éoliennes terrestres, il y a peu de différences technologiques entre les deux types de turbines. Les principales différences sont dues aux contraintes du milieu marin et à la manière de transporter l'électricité vers le continent.

Il y a deux manières d'installer des éoliennes en mer, qui dépendent principalement du fond marin et de sa nature. La première consiste à installer les turbines sur des fondations fixées au fond dans des eaux peu profondes (généralement, moins de 60 m). La majorité des éoliennes en mer sont actuellement installées de cette manière, qui se décline selon différentes technologies de fondations. La deuxième manière consiste à installer les éoliennes sur des plateformes flottantes. Cette manière, qui se décline aussi selon différentes technologies de plateformes, est encore en phase de développement, mais quelques projets pilotes ont été lancés ces cinq dernières années.

Chaque technologie d'installation présente ses avantages et ses inconvénients. La sélection de la technologie nécessite une analyse approfondie pour chacun des sites potentiels identifiés. Cette section présente un survol des technologies d'installation disponibles et de leurs particularités, puis décrit les principales contraintes physiques liées au milieu marin à évaluer avant d'implanter un parc.

2.1 Les technologies d'installation

2.1.1 Particularités des éoliennes en mer

Dans leur principe physique de fonctionnement, les éoliennes en mer ne diffèrent pas de leurs homologues terrestres. Les différences sont dues à leur implantation en milieu marin et sont listées ici :

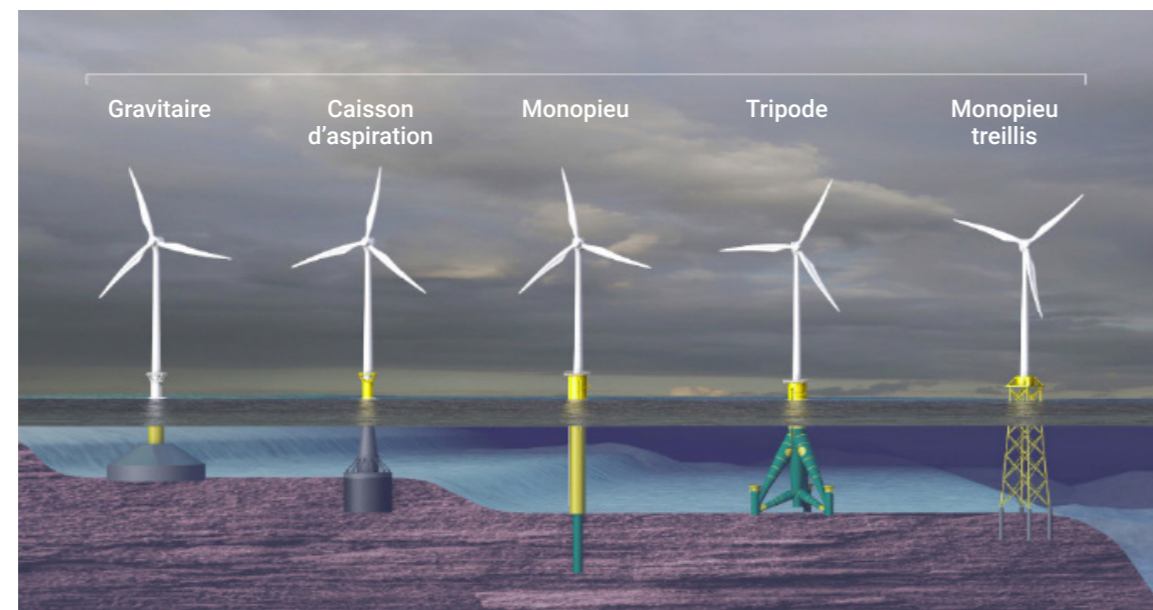
- À moins que le parc ne soit proche de la côte, typiquement à moins de 15 km, il est nécessaire d'installer une sous-station en mer pour collecter l'électricité produite par les turbines, et une autre sous-station, terrestre, pour connecter le parc au reste du réseau de transport d'électricité;
- La sous-station en mer doit convertir l'électricité en courant continu à haute tension et doit être ancrée au fond marin avec les mêmes technologies que celles employées pour les turbines fixes ou flottantes. À noter que les sous-stations flottantes sont encore en développement;
- Les câbles de transmission et connecteurs doivent être conçus de façon à résister aux mouvements induits par les courants marins et les vagues;
- Le déplacement de personnel et d'équipement pour la maintenance et les réparations est coûteux et complexe, car il se fait par bateau ou hélicoptère. Les turbines et sous-stations doivent être équipées de moyens d'accès (quai ou héliport);
- En plus du givre, les conditions de vents et de vagues rendent parfois le site inaccessible pour des raisons de sécurité;
- L'ensemble du parc éolien doit pouvoir résister aux agressions du milieu marin, comme les éléments, la corrosion due à l'eau de mer ou encore la colonisation par des organismes vivants.

2.1.2 Les fondations fixes

De nombreuses éoliennes en mer ont été installées durant la dernière décennie partout dans le monde. Leur puissance moyenne est passée de 3 MW à plus de 7 MW durant cette période [9]. Cette technologie est mature et elle peut être déployée dans la majorité des projets où la profondeur du fond marin est inférieure à 60 mètres. Cinq types de fondations fixes (Figure 1) ont été développés selon la profondeur, la nature du sol et la biodiversité des différents sites [10]–[13]. Ces fondations sont transportées du lieu d'assemblage jusqu'au site par barge ou navire autoélévateur. Ces navires sont équipés de tout le matériel requis pour réaliser l'installation, y compris une grue, un marteau et des pompes. Le coût d'une fondation et de son installation représente en règle générale entre 20 et 25 % des dépenses d'investissement en capital d'une éolienne en mer normale de 6 MW pour une profondeur de 30 mètres [14].

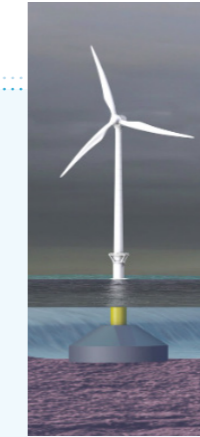
Les caractéristiques des cinq types de fondations fixes sont sommairement décrites ci-après.

Figure 1. Les cinq types de fondations fixes d'éolienne en mer [15]



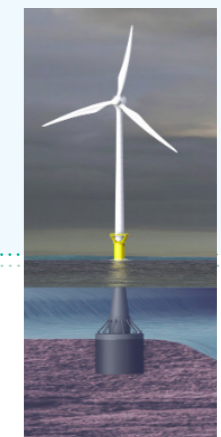
Gravitaire

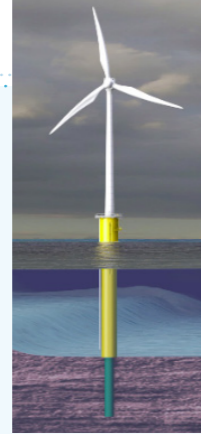
- Type : Gravitaire (*gravity base*).
- Description : Structure large et pesante déposée sur le fond marin. Dans sa plus récente configuration, la fondation est une structure creuse, ce qui facilite sa construction et son transport. La fondation est par la suite remplie de pierre et/ou de sable jusqu'à ce qu'elle atteigne un poids qui lui permet d'être stable.
- Matière : Béton.
- Part du marché : 5 %.
- Profondeur maximale recommandée : 15 m.
- Type de sol : Mieux adapté aux sols plats et durs, avec peu de sédiments.
- Moyen d'installation : Assemblée au port, la fondation est soit transportée sur une barge puis déposée avec une grue, soit reliée à des flotteurs puis remorquée jusqu'au site, où elle est lestée et descendue sur le fond marin.
- Avantage : Très économique et s'installe sans nuisance sonore. Ce type de fondation est aussi très stable et donc idéal dans des conditions de mer extrêmes. De plus, cette fondation forme un récif artificiel qui attire la vie marine.
- Inconvénient : Il faut draguer et niveler le sol du fond marin afin qu'il soit bien lisse et plat, ce qui perturbe le fond marin et son écosystème. De plus, si la fondation est transportée par flottaison, elle peut introduire des espèces envahissantes du port vers le site [10].
- Tendance : Ce type de fondation était populaire au début du développement des éoliennes de mer, quand les sites sélectionnés étaient proches de la côte et dans la suite du dénivelé du littoral. Mais les nouveaux sites sont généralement plus éloignés et ont des profondeurs plus élevées, ce qui rend cette fondation moins attrayante



Caisson d'aspiration

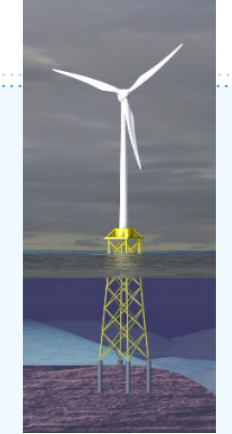
- Type : Caisson d'aspiration (*suction bucket monopile*).
- Description : Large cylindre creux qui est enfoncé dans le fond marin en pompant l'eau hors du cylindre. Les principales configurations emploient soit un seul caisson installé sous un monopieu, ou plusieurs plus petits caissons installés sous chaque patte d'une tour treillis. Un guide de conception a récemment été publié par le programme Offshore Wind Accelerator. [16].
- Matière : Acier.
- Part du marché : < 5 %.
- Profondeur recommandée : 30-60 m.
- Type de sol : Argileux ou sédimenteux (d'une épaisseur de 15-30 m). Le sol doit être assez mou pour permettre au caisson de s'enfoncer, mais pas trop mou, car le maintien ne serait alors pas assez fort, et les sédiments doivent être suffisamment fins pour permettre l'aspiration.
- Moyen d'installation : Le pompage de l'eau hors du caisson réduit la pression dans le caisson, qui est alors poussé dans le sol par la pression exercée par l'eau de la mer sur la partie extérieure du caisson.
- Avantage : Installation rapide avec très peu de nuisance sonore. Le caisson peut facilement être retiré en injectant de l'eau dans le caisson.
- Inconvénient : S'adapte à un type de sol limité. La nature du sol pouvant varier légèrement sur un site donné, cela peut imposer plusieurs designs de caisson.
- Tendance : Utilisation rare.





Monopieu

- Type : Monopieu (*monopile*).
- Description : Pieu enfoncé profondément dans le fond marin. Outre la charge à supporter, le principal élément à considérer durant la conception est la fréquence naturelle de l'ensemble fondation-mât-nacelle. Elle dépend de la hauteur de l'ensemble, de sa masse, des conditions d'opération (vagues, vents) et des caractéristiques de l'éolienne (puissance et contrôle). C'est le fabricant de l'éolienne qui détermine la plage de fréquence acceptable. Le diamètre du pieu augmente en fonction de la profondeur de l'eau et de la taille de l'éolienne. En plus d'augmenter les coûts, cela crée des défis du côté de la fabrication du pieu ainsi que lors des phases de levage et de martèlement [17] que les fabricants de pieux de très grands diamètres (pieux XXL) cherchent à résoudre.
- Matière : Acier.
- Part du marché : 80 %.
- Profondeur maximale recommandée : 40 m.
- Type de sol : Mieux adapté aux fonds marins mous (sable, gravier ou roches molles), qui se prêtent bien au martèlement.
- Moyen d'installation : Le pieu est enfoncé de plusieurs mètres dans le sol à l'aide du marteau du navire autoélévateur.
- Avantage : Économique à des profondeurs moyennes (15-30 m); conception et installation simple; technologie maîtrisée par de nombreux fournisseurs.
- Inconvénient : L'installation par martèlement, qui prend environ 24 h, provoque beaucoup de nuisances sonores et de vibrations, et projette des particules sédimentaires en suspension dans l'eau. La faune locale et le fond marin sont fortement perturbés. Cette perturbation augmente avec le diamètre du monopieu. Plusieurs techniques de mitigation existent ou font l'objet de recherches [18]
- Tendances : Ce type de fondations n'était autrefois pas adapté aux plus grosses turbines et aux eaux de plus de 30 mètres de profondeur, mais certains fabricants ont commencé à développer une nouvelle génération de monopieux, dits XXL, plus longs et plus larges [19], [20]. Ces nouveaux monopieux ont permis quelques installations dans des eaux de 40 mètres de profondeur (par exemple le projet Veja Mate en Allemagne [21]).

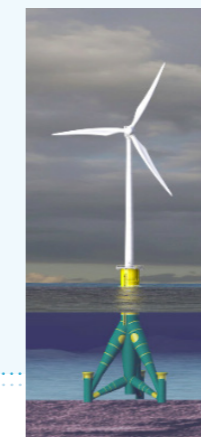


Monopieu treillis

- Type : Monopieu treillis (*jacket*).
- Description : Tour en treillis formée de longerons en acier reliés ensemble pour former trois ou quatre côtés. C'est une structure du même type que celles utilisées dans l'industrie pétrolière et gazière marine.
- Matière : Acier.
- Part du marché : 10 %.
- Profondeur maximale recommandée : 80 m.
- Type de sol : Varié, mais mieux adapté aux fonds marins plus cohésifs. Le sol peut être légèrement irrégulier.
- Moyen d'installation : La tour en treillis s'installe sur des pieux (un par coin) fixés dans le fond marin par martèlement, vissage, vibration ou aspiration. Les pieux peuvent être préfixés, ou être fixés lors de l'installation de la tour.
- Avantage : Parmi les fondations fixes, c'est celle qui s'installe dans les eaux les plus profondes. Comme les pieux sont courts et de diamètre moyen, les fixer dans le fond marin crée beaucoup moins de nuisance sonore qu'un monopieu. C'est une structure économique puisque les procédés de conception et de fabrication des treillis sont bien connus. Cette fondation forme un récif artificiel qui attire la vie marine.
- Inconvénient : Bien que moins bruyante que celle d'un monopieu, l'installation d'un treillis génère néanmoins des nuisances sonores. La base de la structure occupe une surface au sol importante. Le coût de maintenance est élevé (ex : problèmes observés sur le joint entre la tour et les pieux). Les treillis sont plus coûteux qu'un monopieu à des profondeurs d'eau moyennes (15-30 m).
- Tendances : Ce type de fondation demeure rare, mais gagne en popularité à mesure que les éoliennes deviennent plus puissantes et qu'elles sont installées dans des eaux plus profondes.

Tripode

- Type : Tripode (*tripod*).
- Description : Structure intermédiaire entre le monopieu et le treillis, elle a trois pieds ancrés dans le fond marin qui se rejoignent profondément sous le niveau de la mer pour former un seul long pilier.
- Matière : Acier.
- Part du marché : Rare.
- Profondeur maximale recommandée : Adapté aux eaux profondes (40-80 m).
- Type de sol : Varié (sauf si galets de grande taille).
- Moyen d'installation : Similaire au monopieu treillis.
- Avantage : L'avantage des structures tripodes est qu'elles sont adaptées aux grandes profondeurs. De plus, elles ne nécessitent que peu de préparation sur le site avant leur installation [22].
- Inconvénient : Structure de fabrication complexe, et non adaptée à des profondeurs inférieures à 7 m, ni aux endroits où il y a des galets de grande taille.
- Tendances : Utilisation très rare, en partie à cause de la complexité de sa fabrication et du risque de collision des bateaux de service avec le châssis d'acier des fondations.



2.1.3 Les plateformes flottantes

La technologie des éoliennes en mer flottantes (EMF) a été développée récemment afin de pouvoir les installer sur des sites de plus en plus profonds (> 60 m), c'est-à-dire là où sont situées près de 80 % des ressources de vent en mer [23]. Cette technologie est basée sur des caissons de grand volume à flottabilité positive et reliés au fond marin par une combinaison d'amarres et d'ancres. Les avantages et désavantages des structures flottantes par rapport aux fondations fixes sont résumés dans le Tableau 1 [24].

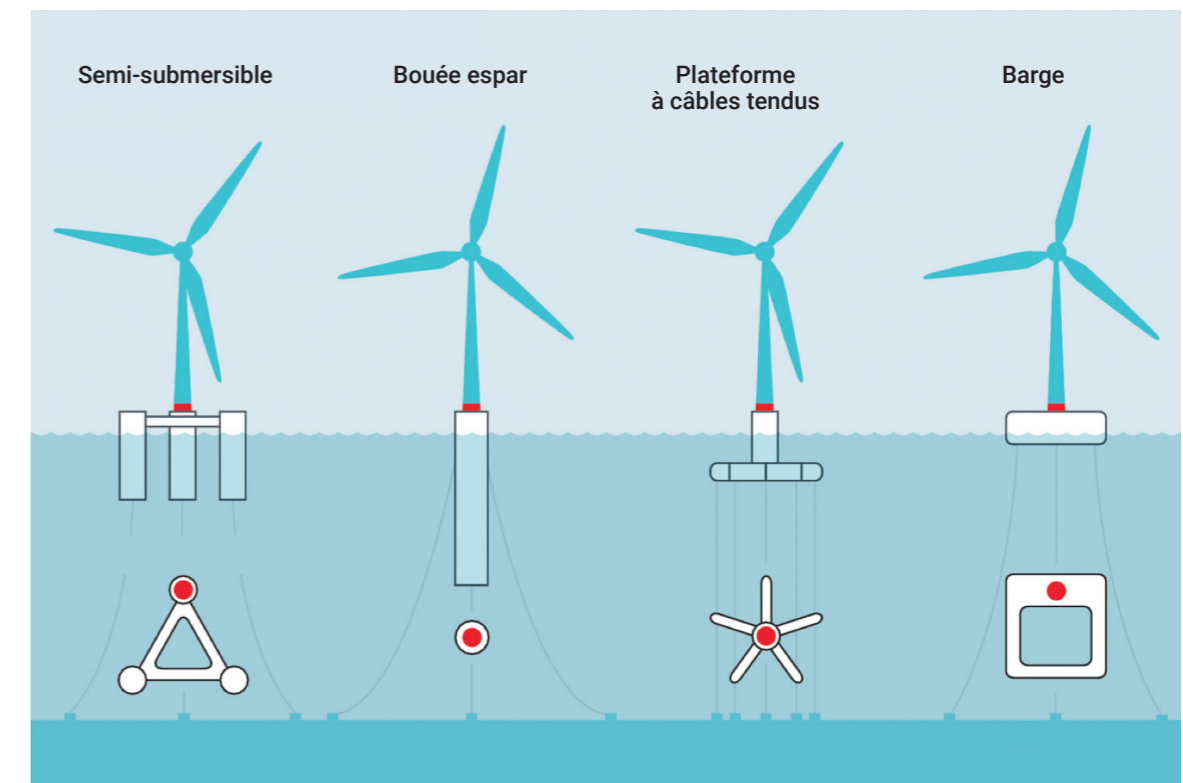
Tableau 1. **Caractéristiques des plateformes flottantes comparées aux fondations fixes pour l'installation d'EMF**

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • S'installe en eau profonde (60-200 m), ce qui donne accès à 80 % de la ressource extracôtière • Dérange moins l'environnement local • Ne nécessite pas de navire autoélévateur pour l'installation • Simple à retirer : peut par exemple être remorquée à un port pour un entretien majeur, puis être ramenée au site et réamarrée • Offre une grande flexibilité quant au choix du site d'installation 	<ul style="list-style-type: none"> • Encore en démonstration • Présentement 2-3 fois plus chère que sur fondations fixes • Sensible aux mouvements dus aux vagues, particulièrement au tangage, qui réduit la puissance générée par la turbine et peut endommager les éléments mécaniques situés dans la nacelle • Conception du câble de transmission plus complexe : fatigue due au mouvement de la plateforme, aux vagues et au courant [25] • Risque plus élevé d'introduction d'espèces envahissantes du port vers le site [10]

Plusieurs projets de démonstration d'éoliennes en mer flottantes de 2 à 7 MW ont été réussis au cours des dix dernières années dans des eaux de 33 [26] à 200 [27] mètres de profondeur. Ces succès ont engendré quelques projets commerciaux de petite envergure qui ont été mis en service au cours des cinq dernières années. Par exemple : Hywind Scotland d'Equinor, 5 éoliennes x 6 MW, en 2017, en Écosse [28] ; WindFloat Atlantic, 3 x 8,4 MW, en 2020, à Viana do Castelo, au Portugal [29] ; Kincardine, 5 x 9,5 MW, en 2021, dans l'Aberdeenshire, en Écosse [30]. La profondeur de la mer dans ces trois projets varie entre 40 et 120 m. On voit donc une tendance qui indique que la taille des parcs éoliens marins avec plateformes flottantes est maintenant en augmentation.

Le coût actualisé de l'énergie (CADE) des EMF est environ deux fois plus élevé que celui des éoliennes en mer avec fondations fixes. Cela est principalement dû au coût des plateformes flottantes, tandis que l'éolienne en soi ne représente que 17 % du coût total [14], [31]. Le coût des plateformes devrait toutefois diminuer avec leur standardisation et la hausse de leur production, en plus des leçons apprises avec les projets pilotes. Des projets commerciaux de grande taille devraient être mis en service durant la décennie; ainsi, un projet de 1320 MW est en développement en Corée du Sud [32] (profondeur moyenne de la mer : 250 m). Comme avec les éoliennes à fondations fixes, il existe différents types de plateforme (montrés à la Figure 2) et différents systèmes d'ancrage pour relier les EMF au fond marin; ces points sont décrits ci-après [24], [33]–[36].

Figure 2. **Les quatre principaux types de plateformes flottantes** [37]

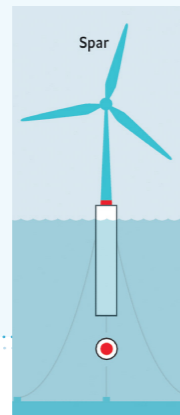


Le coût des plateformes devrait diminuer avec leur standardisation et la hausse de leur production, en plus des leçons apprises avec les projets pilotes.

2.1.3.1 Les technologies de plateformes

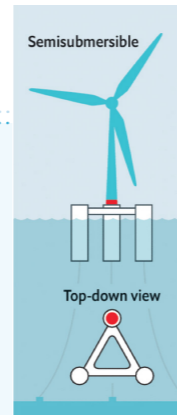
Bouée espar

- Type : Bouée espar (*spar buoy*).
- Description : Très long cylindre creux et lesté pour que le centre de gravité soit bien en-dessous de la ligne de flottaison, ce qui le maintient droit et stable même dans les fortes vagues. La conception est simple : le diamètre et la longueur du cylindre permettent de déplacer suffisamment de volume d'eau pour assurer la flottabilité. La masse de la partie basse du cylindre et un ratio longueur sur diamètre élevé assurent une bonne stabilité même dans les fortes vagues. La difficulté de fabrication du cylindre augmente avec le diamètre.
- Matière : Béton ou acier.
- Part du marché : 50 %.
- Profondeur recommandée : Préférentiellement plus de 100 m.
- Moyen d'installation : Remorquage du port vers le site, où le cylindre est relié à des ancres par des amarres.
- Avantage : Conception simple et économique.
- Inconvénient : Empreinte verticale très élevée : les eaux du port et vers le site doivent être assez profondes pour permettre la fabrication et le remorquage du cylindre. Un transport horizontal suivi d'une installation verticale au site, avec navire autoélévateur, peut être nécessaire. Cela complexifie aussi le retour au port pour un entretien.
- Tendances : Certains projets en construction utilisent cette technologie (dont celui de Goto, au Japon [38]), mais elle semble perdre du terrain face aux plateformes semi-submersibles.



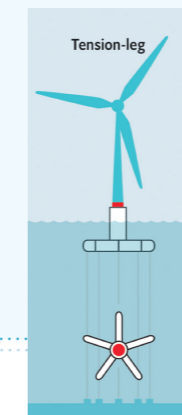
Semi-submersible

- Type : Semi-submersible (*spar-submersible*).
- Description : Plateforme constituée de plusieurs (généralement trois) cylindres creux et courts reliés ensemble par des longerons. Les cylindres de grand diamètre procurent la flottabilité nécessaire tandis que la stabilité est assurée par l'empreinte globale au sol de la plateforme et par un système de ballasts dynamiques.
- Matière : Béton ou acier.
- Part du marché : 50 %.
- Profondeur recommandée : Dès 50 m.
- Moyen d'installation : Remorquage du port vers le site, où la plateforme est reliée à des ancres par des amarres relâchées ou tendues.
- Avantage : Assemblage complet au quai, turbine comprise. Temps et coût d'installation au site réduit. Peut être ramenée au port pour un entretien.
- Inconvénient : Assemblage complexe et plus coûteux. Son empreinte large rend la plateforme sensible aux mouvements induits par les vagues.
- Tendances : C'est le concept le plus fréquemment utilisé ces dernières années, par exemple pour la plateforme WindFloat de Principle Power [39]. La plateforme modulaire Hive Wind [40] est aussi en développement.



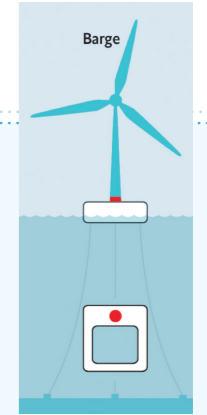
Plateforme à câbles tendus

- Type : plateforme à câbles tendus (*tension-leg platform*).
- Description : Plateforme ayant une flottabilité positive importante et une petite empreinte au sol, fixée au fond marin par des câbles tendus appelés jambes de tension. La tension dans les jambes est créée par le surcroît de flottabilité, car la plateforme est sous sa ligne de flottaison et tend donc à remonter vers la surface. C'est ce qui assure la stabilité verticale et horizontale.
- Matière : Béton ou acier.
- Part du marché : 0 % (encore en phase de développement).
- Profondeur recommandée : 50-200 m.
- Moyen d'installation : Remorquage du port vers le site, où la plateforme est reliée à des ancres par des câbles ou des chaînes.
- Avantage : Plateforme flottante la plus stable et donc la moins sensible aux vagues et aux courants. Assemblage complet au quai, turbine comprise, et peut être remorquée pour l'entretien.
- Inconvénient : Installation plus complexe et coûteuse. Garder la plateforme stable durant le transport est plus difficile à cause de sa flottabilité importante.
- Tendances : Encore en prédémonstration. Le projet pilote Provence Grand Large utilisera ce concept (mise en service prévue : 2023) [41].



Barge

- Type : Barge.
- Description : Plateforme très large et plate qui, contrairement à la plateforme semi-submersible, n'utilise pas de cylindres partiellement immergés pour assurer sa flottabilité.
- Matière : Acier.
- Part du marché : 0 % (quelques démonstrateurs seulement).
- Profondeur recommandée : 50-200 m.
- Moyen d'installation : Remorquage du port vers le site, où la plateforme est reliée à des ancres par des câbles ou des chaînes.
- Avantage : Simple à construire, très faible tirant d'eau.
- Inconvénient : Grande empreinte horizontale. Il faut généralement ajouter de larges plaques sous la plateforme pour réduire l'impact des mouvements induits par les vagues.
- Tendances : Encore en démonstration. Conçue entre autres par la compagnie BW Ideol (Floatgen) [26].



2.1.3.2 Les systèmes d'ancrage

Toutes les plateformes flottantes doivent être fixées au fond marin par des amarres reliées à des ancres, généralement trois ou quatre (voir les références relatives aux plateformes flottantes et [42], [43]).

Il existe trois types d'amarres :

Caténaire relâchée : c'est le type d'amarres le moins cher et le plus fréquemment utilisé avec les EMF. Les caténaires sont des câbles en acier ou des chaînes lourdes mais flexibles qui ne sont pas tendus autrement que par leur propre masse. Avec ce type d'amarres, l'excursion de la plateforme autour de ses points d'ancrage au gré des courants de surface doit être limitée pour éviter les contacts avec les autres plateformes, ce qui requiert une zone d'amarrage plus grande que la surface de la plateforme elle-même. Les caténaires sont généralement quatre fois plus longues que la profondeur au site d'ancrage, car une longue portion de la caténaire repose sur le fond marin. Quand la plateforme bouge, cette portion est soulevée du fond marin, et la gravité qui cherche à ramener la caténaire au sol tend à freiner ces déplacements;

Amarrage tendu : ici, les caténaires sont tendues mécaniquement afin de réduire les mouvements verticaux et horizontaux de la plateforme, sans les empêcher complètement. Les caténaires arrivent avec un angle donné au fond marin, afin que la plateforme reste près du point central entre les ancrages;

Jambes de tension : ce sont des amarres tendues par des masses enfouies dans le sol marin pouvant peser des milliers de tonnes et qui sont soumises à des forces très élevées lorsque la mer est forte.

Il existe deux types d'ancres :

Ancres fixées : elles sont similaires à celles utilisées avec les fondations fixes : pieu martelé, pieu vissé ou caisson d'aspiration. Elles sont toutefois plus petites et elles sont reliées à la plateforme à l'aide d'amarres détachables. Leur installation est plus complexe et plus coûteuse que celles des ancres non fixées et elles sont surtout utilisées sur des sites exposés à des conditions difficiles de mer ou de fond marin;

Ancres non fixées : elles peuvent être de type gravitaire ou à draguer. Les ancres gravitaires sont de simples masses très lourdes déposées sur le fond marin. Elles s'utilisent sur un sol dur mais plat, où elles ne risquent pas de s'enfoncer et/ou de s'incliner. Les ancres à draguer sont similaires à des ancres de bateau modifiées afin de résister aussi à des charges verticales. Elles sont utilisées sur des sols sédimenteux ou rocheux, là où elles pourront s'enfoncer en profondeur ou s'accrocher solidement. C'est l'option la plus économique.

2.1.4 Normes IEC de construction

La construction de parcs éoliens en mer est régie par un certain nombre de normes internationales. Les principales sont simplement listées ci-dessous :

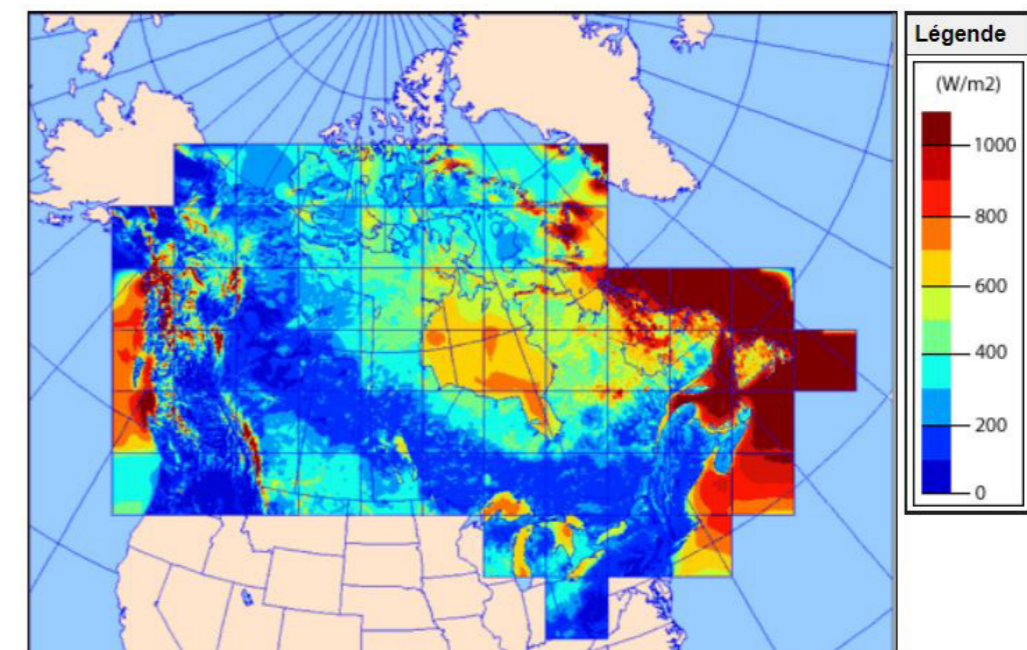
- La norme IEC 61400-3 précise les exigences sur les calculs de charge concernant les vagues, les courants, le niveau de la mer, la glace de mer, la biodiversité marine et l'érosion du fond marin.
 - La norme IEC 61400-3-1 (2019), qui décrit les exigences pour les éoliennes en mer à fondation fixe;
 - La norme IEC 61400-3-2 (approbation finale prévue en 2024), qui décrit les exigences pour les éoliennes en mer flottantes;
- La norme IEC 61400-3-1-6.2 (encore sous forme d'ébauche), qui décrit les classes de turbines;
- La norme IEC 61400-1, qui est la norme pour les éoliennes terrestres, mais auquel la norme 61400-3 renvoie pour la majorité des éléments techniques qui n'impliquent pas la mer;

2.2 Les conditions propres au milieu marin

2.2.1 Le vent

Comme pour les parcs éoliens terrestres, la première démarche à réaliser avant d'entreprendre un projet de parc éolien en mer consiste à estimer son gisement éolien. Pour cela, il existe différentes sources accessibles, comme les cartes produites par Environnement Canada (Figure 3).

Figure 3. Énergie moyenne annuelle du vent à 80 m de hauteur [44].



On voit sur la Figure 3 que la façade atlantique canadienne possède un fort potentiel éolien, tandis que le potentiel est moins prononcé du côté pacifique. Il faut cependant noter que ces cartes sont établies à partir de simulations numériques qui s'appuient sur un nombre limité de mesures acquises par des bouées océanographiques, donc fortement interpolées. Malgré cette limitation, les cartes obtenues de cette manière sont utiles au moins en première approche [45].

.....

**La façade atlantique
canadienne possède
un fort potentiel
éolien extracôtier.**

.....

À partir du moment où un projet se confirme, il devient nécessaire de faire des mesures plus précises sur le site choisi. Cela peut être entrepris avec des mâts météorologiques ou des lidars (*Light Detection And Ranging*). Les lidars peuvent caractériser le vent en continu sur des profils verticaux ou sur des volumes prédéfinis au-dessus du site (cas des lidars 3D à balayage). Ces instruments sont de plus en plus préférés aux mâts, car ces derniers sont coûteux à installer, surtout à mesure que la taille des turbines augmente [46]. Un autre avantage des lidars est qu'ils peuvent continuer à servir une fois le parc installé pour monitorer les performances des turbines en fonction du vent; c'est d'ailleurs pourquoi une procédure standard de mesure par lidar a été introduite dans la norme IEC 61400 en 2017.

Les grandeurs physiques qui sont acquises sont les mêmes que celles pour les parcs éoliens terrestres :

- Vitesse, direction et cisaillement du vent;
- Turbulence;
- Masse volumique de l'air (température, pression et humidité relative);
- Coups de vent extrêmes mesurés sur une période de 50 ans.

Une grande différence entre l'éolien en mer et le terrestre est que la surface de la mer est globalement plane alors que le relief du terrain peut être complexe sur terre. Cependant, des vagues peuvent se former lorsque la force des vents augmente, ce qui crée une surface dynamique, alors qu'elle reste statique sur terre. La turbulence et le cisaillement des vents augmentent donc plus rapidement en mer que sur terre.

2.2.2 L'environnement marin

Les paramètres principaux régissant les conditions marines en ce qui concerne les parcs éoliens en mer sont les vagues, les courants, les marées et la topographie du fond marin. Il est donc nécessaire de les évaluer avant tout projet d'implantation.

La dynamique des vagues et des courants est généralement complexe et dépend fortement des vents, mais aussi de la profondeur du fond marin, de son relief, de la densité de l'eau de mer, des fleuves, etc. L'évaluation du site doit comprendre les conditions moyennées ainsi que les conditions extrêmes susceptibles de se produire une fois tous les 50 ans.

Les vagues et la houle dues au vent, de même que la marée, doivent être prises en compte lors de la conception des turbines et des fondations des éoliennes, surtout si elles génèrent des contraintes périodiques susceptibles d'accélérer le vieillissement des structures.

Les plateformes flottantes sont particulièrement sensibles à l'état de la mer, qui peut induire des mouvements verticaux et horizontaux ainsi que des rotations en tangage. Ce dernier point est à surveiller avec attention, car d'une part cela peut affecter la production d'électricité si la turbine n'est pas verticale, et d'autre part cela peut générer des contraintes accrues sur des éléments mécaniques qui sortent de leur domaine de fonctionnement normal.

Les caractéristiques du fond marin sont essentielles dans le choix des sites d'implantation et des technologies pour les plateformes. Le paramètre le plus important est la profondeur, qui va en grande partie déterminer si les plateformes seront fixes ou flottantes. Tous les parcs éoliens en mer se situent sur le plateau continental. Celui-ci est un prolongement de la côte sous la mer, sa largeur peut aller d'une dizaine à plusieurs centaines de kilomètres selon les régions [47], sa profondeur augmente lentement en s'éloignant de la côte jusqu'à la ligne de rupture de pente située entre 100 et 200 m sous le niveau de la mer; au-delà il y a le talus continental puis les plaines abyssales [48]. Des cartes bathymétriques précises sont disponibles, comme celles produites par la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) [49]. La surface totale des plateaux continentaux sur lesquels peuvent être installés des parcs éoliens est plus petite que celle des parties émergées des continents, mais la taille sensiblement plus grande des éoliennes en mer fait que ces gisements représentent un potentiel très élevé [50]. Le fond peut être dur ou couvert de sédiments, et la roche sous-jacente peut être dure ou friable [51]. Tout cela doit être pris en compte dans le choix des technologies de plateforme et de forage pour les fondations.

Enfin, il faut aussi prendre en considération des phénomènes comme la sismicité qui peuvent affecter certaines régions et les rendre impropres à une implantation de parcs éoliens en mer.

2.2.3 Cas du climat froid

Le climat froid concerne tout particulièrement le Canada, dont la partie nord est soumise aux vents venant de l'Arctique. Les deux phénomènes typiques apparaissant en climat froid sont le givre et la glace de mer.

Il faut noter que le givre peut aussi apparaître à basse latitude, mais il est plus fréquent à mesure que l'on se rapproche des pôles. Le givre est bien étudié et compris en ce qui concerne les navires ou les plateformes pétrolières en mer [52], mais les pales tournent beaucoup plus haut au-dessus du niveau de la mer et devraient être peu impactées par des embruns verglaçants. Le givre est aussi très étudié sur les parcs éoliens terrestres à cause des pertes de performance qu'il engendre. En revanche, il y a peu d'études sur le givre des éoliennes en mer, car il y a peu de parcs éoliens en mer, et ceux situés en climat froid sont encore plus rares.

La glace de mer peut exercer des charges importantes sur les structures, surtout si elle est dérivante, ce qui entraîne des coûts supplémentaires pour les renforcer. Il ne semble pas possible avec les technologies actuellement disponibles de concevoir des parcs éoliens marins en climat froid avec des plateformes flottantes, mais des recherches sont en cours concernant les plateformes fixes [53]. La glace de mer est l'une des charges à prendre en compte lors de la conception de fondations fixes dans la norme IEC 61400-3-1. Il existe déjà un projet réussi d'implantation d'un parc éolien dans une mer pouvant être recouverte de glace [54].

2.2.4 Rôle de la côte

La distance entre les parcs éoliens en mer et la côte est un paramètre important, car elle impacte fortement le coût et le rendement des projets. Il faut trouver le bon compromis entre des parcs éoliens éloignés des côtes, capables de produire de grandes quantités d'électricité mais dont le coût d'installation ainsi que celui des câbles de transmission est élevé, et des parcs plus proches et plus faciles à installer, mais produisant moins. La Figure 4 montre que plus on s'éloigne de la côte, plus la puissance augmente.

Figure 4. Distribution des capacités de production d'électricité en fonction de la distance à la côte et de la profondeur [55]

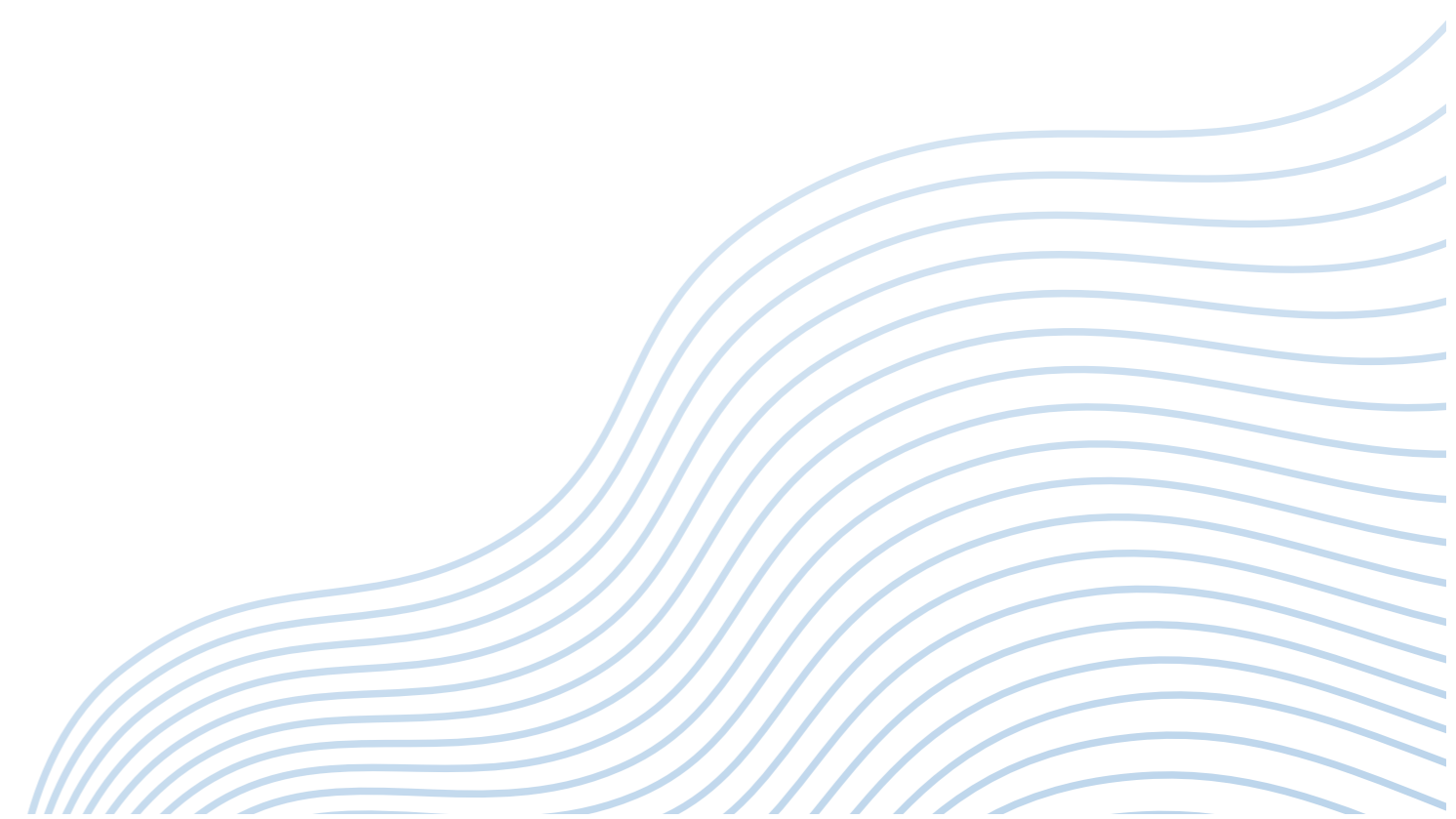
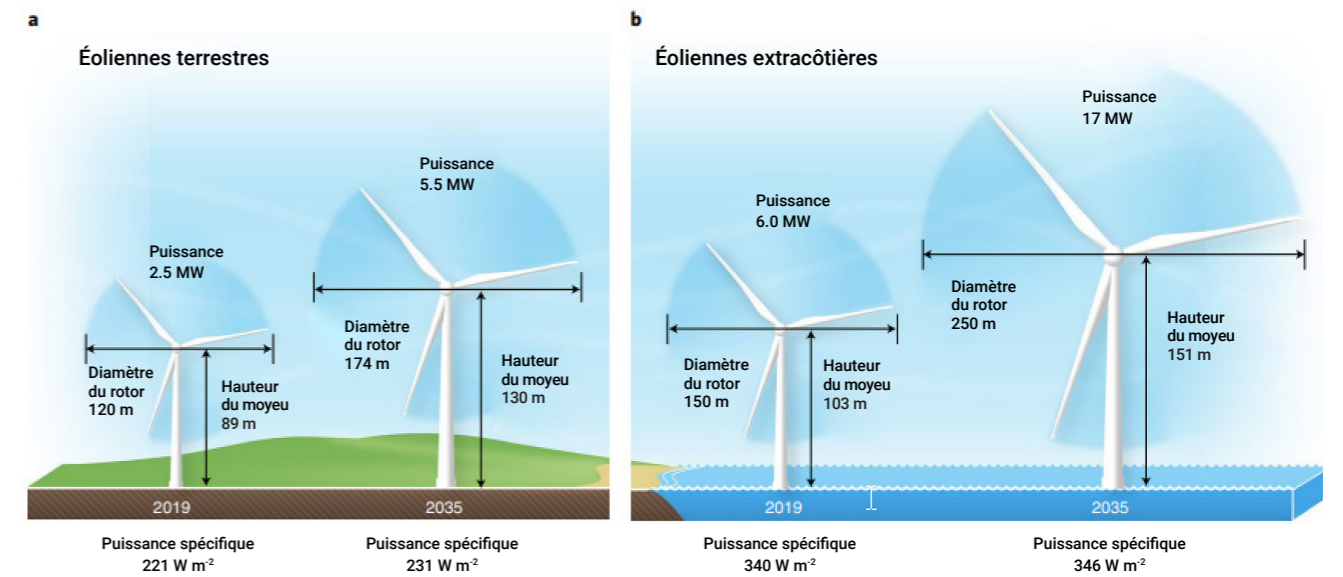


Source: IRENA Renewable Cost Database.

2.3 Comparaison avec les éoliennes terrestres

La différence principale entre les éoliennes terrestres et les éoliennes en mer concerne leurs tailles respectives, car celles en mer ne sont pas limitées par les considérations de nuisances sonores ou visuelles dont il faut tenir compte à proximité des habitats humains. La puissance générée par une éolienne en mer est par conséquent beaucoup plus élevée que celle d'une éolienne terrestre. La Figure 5 illustre cette différence.

Figure 5. Comparaison des tailles et puissances des éoliennes sur terre et en mer [56]



Le Tableau 2 résume les autres principaux avantages/inconvénients des éoliennes de mer comparées aux éoliennes terrestres [57]–[59].

Tableau 2. Avantages et inconvénients des éoliennes en mer comparées aux éoliennes terrestres

	Avantages	Inconvénients
Ressource éolienne et conditions climatiques	<ul style="list-style-type: none"> • Vents plus forts [60], plus réguliers et moins turbulents du fait de l'absence de relief • Les éoliennes en mer produisent donc plus et de manière plus fiable 	<ul style="list-style-type: none"> • Du fait de l'absence de relief, le sillage aérien des turbines est plus important et plus persistant, d'autant plus que les éoliennes de mer sont plus grandes • Effet de la glace de mer mal connu, car un seul parc démonstrateur a été installé en climat froid
Lieux d'installation	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de compétition pour des terrains agricoles ou constructibles • Absence de contraintes liées au relief, ce qui leur permet de bénéficier de vents forts et constants peu importe la direction • Proche de la demande, car 40 % de la population mondiale vit à moins de 100 km des côtes [61] 	<ul style="list-style-type: none"> • Le coût d'opération et de maintenance est plus élevé du fait de la difficulté d'accès • On ne peut pas avoir une équipe en permanence sur le site, ce qui peut entraîner des retards dans les inspections et réparations • Le travail sur site est plus pénible que sur terre, du fait des éléments
Transport et entraves à la navigation	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de limitation en transport terrestre (routes, ponts, etc.) • Pas de limitation sur la taille des éléments des turbines 	<ul style="list-style-type: none"> • Les parcs éoliens marins peuvent potentiellement entraver la navigation • Ils peuvent aussi empiéter sur les zones de pêche
Coût	<ul style="list-style-type: none"> • En Europe, le récent contrat d'approvisionnement en électricité a montré que l'éolien en mer avec fondations fixes pouvait d'ores et déjà être compétitif [62]; l'éolien extracôtier rattrape donc son retard 	<ul style="list-style-type: none"> • Par manque de maturité, 1 MWh produit en mer coûte 77 USD, soit un peu plus de deux fois le coût de 1 MWh d'éolien terrestre (34 USD), mais les progrès technologiques font baisser les coûts [14] • Les prix des fondations, sous-stations et câbles de transmission sont élevés • Risques financiers actuels considérés comme plus élevés, ce qui engendre un financement plus cher • Pas de revenu partagé avec les communautés locales • Déplacements pour entretien et réparation plus complexes et coûteux
Impact environnemental	<ul style="list-style-type: none"> • Les fondations peuvent constituer des refuges ou des nurseries pour certaines espèces marines • Les parcs peuvent constituer des sanctuaires pour la faune et la flore marine 	<ul style="list-style-type: none"> • Impact sur la vie marine mal connu, en particulier sur la fréquence des collisions des oiseaux de mer avec les pales d'éoliennes • Dégradation des fonds marins au niveau des fondations et augmentation de la turbidité

Ne sont pas listées dans le Tableau 2 les questions de sécurité, alors que les parcs éoliens en mer sont des infrastructures stratégiques qui peuvent être plus difficiles à protéger contre des actes de malveillance ou de guerre que leurs homologues terrestres. De même, en cas de catastrophes naturelles telles que séismes ou ouragans, il serait plus difficile d'intervenir en mer que sur terre pour faire les réparations ou récupérer le matériel brisé.

Un autre paramètre à prendre en considération est le fait qu'au Canada, environ 20 % de la population vit à moins de 100 km des côtes Atlantique, Pacifique ou Arctique [63]. Cela veut dire qu'une bonne partie des consommateurs et des industries est concentrée sur la bande côtière, et que donc les parcs éoliens en mer sont situés près de la charge, là où il existe déjà des infrastructures pour le transport et la distribution d'électricité.

Néanmoins, la proximité avec les côtes peut mettre les parcs éoliens en mer en concurrence avec d'autres activités humaines comme la pêche ou le trafic maritime; ces points seront abordés dans la section suivante. On le voit donc, le choix du site d'implantation d'un parc éolien en mer est une affaire de compromis qui requiert un examen minutieux de tous les paramètres.

Les parcs éoliens en mer sont situés près de la charge, là où il existe déjà des infrastructures pour le transport et la distribution d'électricité.





3. Les impacts environnementaux et socioéconomiques

3.1 Impact sur l'environnement

3.1.1 Introduction

Dans un pays soucieux du bien-être de sa population et de la compétitivité de ses industries comme le Canada, les enjeux environnementaux et socioéconomiques de l'implantation de parcs éoliens en mer sont étudiés à différents échelons, du municipal au fédéral, sans oublier les communautés autochtones. D'une manière générale, l'ajout d'infrastructures de production d'énergie renouvelable ne doit pas entraîner de dommages environnementaux importants ni compromettre les objectifs environnementaux du milieu où elles sont installées. Les nouveaux projets doivent être compatibles avec les objectifs de protection et de conservation de la biodiversité, par exemple, l'Objectif de développement durable 14 de l'ONU : Vie aquatique, les objectifs post-2020 de la Convention sur la diversité biologique [64] ou encore les objectifs du Cadre mondial de la biodiversité de Kunming à Montréal (dont la protection de 30 % des surfaces maritimes et terrestres d'ici 2030) [65].

Des études antérieures ont montré un écart entre les risques perçus et réels. Cet écart résulte de l'incertitude ou du manque de données sur les impacts environnementaux réels des parcs éoliens en mer [66]. Ces incertitudes entraînent à leur tour des retards importants lors des processus d'autorisation [67].

Afin de réduire l'impact sur l'environnement, les projets éoliens en mer sont examinés attentivement par les agences gouvernementales dès le stade de la planification pour s'assurer que les développeurs effectuent une étude d'impact détaillée et, s'ils sont approuvés, mettent en place des mesures pour se conformer aux normes de protection marine tout au long de la vie du projet. Par exemple, le Crown Estate au Royaume-Uni a récemment bloqué l'expansion du parc éolien marin de Race Bank suite à l'évaluation de la réglementation sur les habitats [68].

Les études environnementales des projets éoliens en mer classent souvent les impacts sur la faune marine en fonction de quatre groupes :

- Les organismes benthiques;
- Les poissons;
- Les mammifères marins;
- Les espèces aériennes (principalement les oiseaux et les chauves-souris).

À cela doivent s'ajouter des études sur la flore marine, en particulier là où existent des forêts d'algues comme les kelps, mais cela semble peu étudié. Il faut noter que les structures sous-marines ne sont pas nécessairement nuisibles à la faune ou à la flore et qu'en constituant des récifs artificiels, elles peuvent servir d'habitat à toutes sortes de vie marine [69], [70].

Les impacts environnementaux des projets éoliens en mer dus au bruit, à la lumière ou à la turbidité se produisent au cours des trois phases du cycle de vie d'un projet : construction, exploitation et fin de vie. Les impacts de la phase de construction sont généralement considérés comme étant intenses, mais de courte durée, tandis que ceux de la phase d'exploitation sont plus durables et plus complexes. Quant à la troisième et dernière phase, les impacts vont dépendre du choix de fin de vie, soit le démantèlement total ou partiel, le rééquipement total ou partiel, ou le prolongement d'exploitation [71].

3.1.2 Impact sur la faune marine

La production d'électricité provenant de parcs éoliens en mer peut avoir des impacts à la fois positifs et négatifs sur les écosystèmes marins. La Figure 6 présente les impacts les plus fréquemment rapportés [72]. À noter que les impacts négatifs touchent surtout la faune à la surface de la mer (mammifères marins) ou au-dessus (oiseaux), tandis que les impacts positifs profitent à la faune sous-marine (poissons et invertébrés).

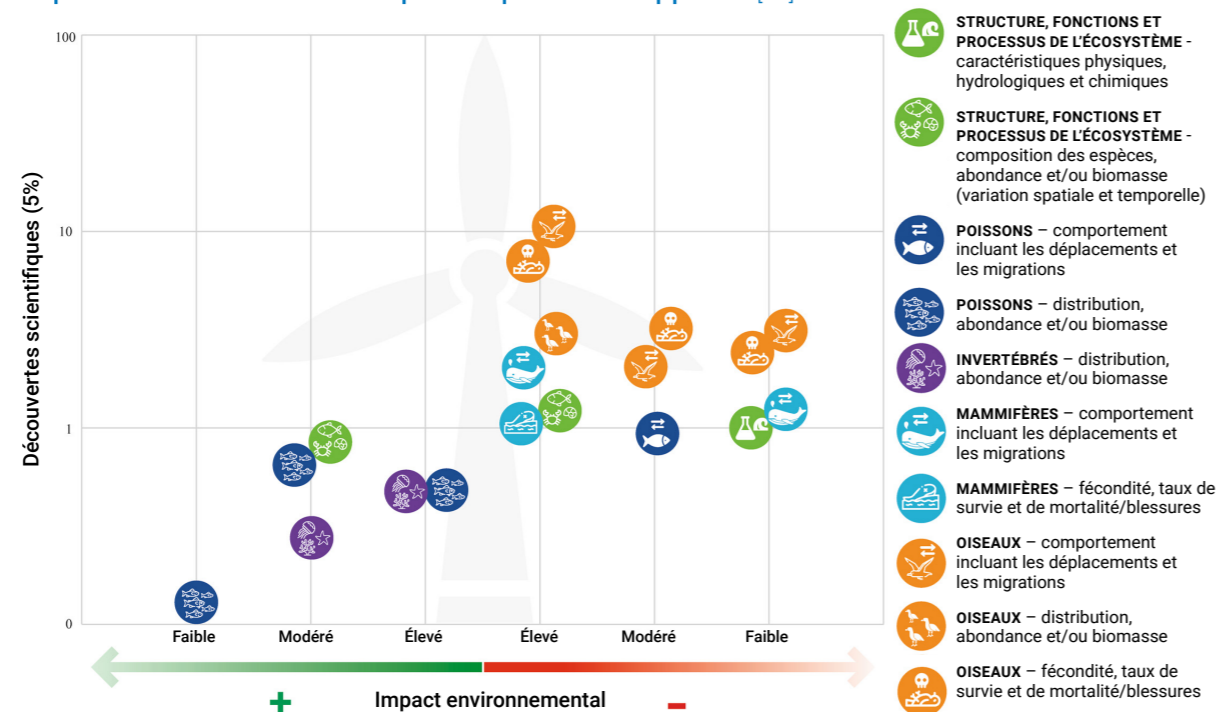
Parmi les impacts négatifs, on peut mentionner :

- Modification de l'habitat;
- Déplacement de populations animales durant la construction ou à cause du bruit pendant la phase d'exploitation;
- Blessures durant la construction ou à cause des structures artificielles (collisions, évitement d'obstacles);
- Perturbations du champ électromagnétique pour les espèces migratrices qui se servent du magnétisme terrestre pour s'orienter;
- Les champs magnétiques créés par les éoliennes peuvent aussi engendrer du stress et occasionner des changements de comportement interférant avec la reproduction [73];
- Pollution chimique (peinture, graisse, hydrocarbures des générateurs).

Et, du côté des impacts positifs :

- Productivité biologique accrue et connectivité écologique améliorée par l'effet récif;
- Les fondations créent des refuges et des nurseries, elles peuvent aussi augmenter le nombre d'espèces dans la zone des éoliennes [74];
- Création de facto de sanctuaires marins en interdisant la pêche à proximité des parcs éoliens en mer.

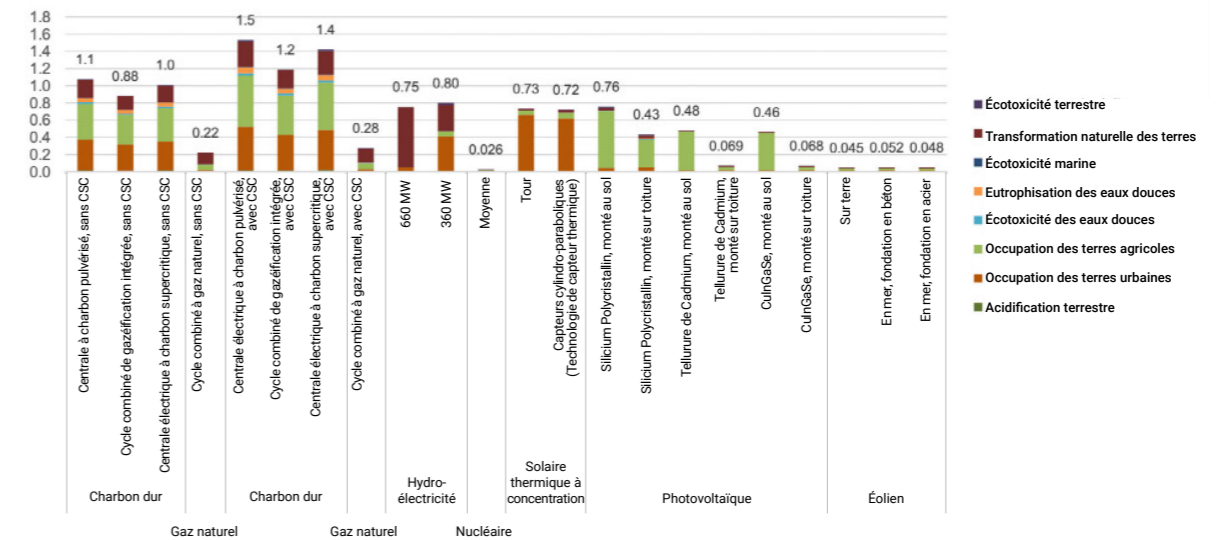
Figure 6. Impacts environnementaux les plus fréquemment rapportés [72]



L'implantation d'un parc éolien en mer peut aussi s'accompagner de l'introduction accidentelle d'espèces exogènes lorsque les pièces des turbines sont transportées du lieu de fabrication jusqu'au site. Mais jusqu'à présent, aucune étude n'a montré que cela mettrait en danger les espèces indigènes [75]. Comme le montre la Figure 7 [76], l'éolien extracôtier est l'une des méthodes de production d'électricité qui ont le moins d'impact sur les écosystèmes.

Un récapitulatif de l'impact de l'éolien extracôtier sur la faune marine est donné à l'annexe A.

Figure 7. Comparaison des impacts de plusieurs sources d'électricité sur les écosystèmes [76]



3.1.2.1 Impacts durant la phase de construction

En 2022, la majorité des parcs éoliens en mer installés utilisent des fondations fixes. Les types les plus courants sont le monopieu et la base gravitaire. Pour les fondations de type monopieu, le bruit produit par le battage des pieux peut avoir des effets négatifs importants sur les mammifères et les reptiles marins, ainsi que sur les poissons, par exemple des dommages physiques, une altération des capacités d'interprétation acoustique, un masquage de la communication au sein des espèces et une réduction temporaire de la taille de l'habitat [77]. Par contre, les espèces démersales (qui vivent près du fond sans y être de façon permanente) de poissons n'ont pas été significativement perturbées par la construction du parc de Block Island (États-Unis) [78].

Les évaluations d'impact sur les mammifères marins pour les projets éoliens en mer en Europe ont souvent pris en compte les marsouins communs et les phoques communs, les grandes baleines telles que la baleine franche de l'Atlantique Nord, la baleine bleue, la baleine à bosse et le rorqual commun. Ces espèces sont considérées comme sensibles au bruit de battage de pieux [79]. Pour les mammifères marins, le comportement d'évitement dû au bruit de la construction devrait être plus probable que la mortalité directe, et des recherches supplémentaires pour comprendre ces conséquences à long terme sont nécessaires [79]. Les conclusions des études européennes peuvent être réutilisées au Canada, où ces espèces marines sont courantes.

Différentes études indiquent que le bruit du battage de pieux, qui peut atteindre 260 dB, peut entraîner différents impacts négatifs tels que :

- Blessures physiques aux animaux marins,
- Réponses comportementales,
- Masquage de la communication et de l'orientation.

Les espèces en voie de disparition ou celles dont les niveaux de reproduction sont faibles peuvent être particulièrement vulnérables [79], [80].

3.1.2.2 Impacts durant la phase d'exploitation

Les impacts sur la faune marine pendant l'exploitation sont généralement moins sévères que ceux de la phase de construction et peuvent être positifs ou négatifs en fonction des conditions locales et des objectifs de planification marine [81]. Le risque de déficience auditive permanente ou transitoire due au bruit opérationnel chez les mammifères marins et les poissons semble assez faible et, dans certains cas, les parcs éoliens extracôtiers peuvent être autorisés à fonctionner dans des zones marines protégées [82]. Bien que peu de parcs éoliens extracôtiers aient été démantelés à ce jour, les impacts et les risques devraient être similaires à ceux de la phase de construction lors du démantèlement [81].

Les risques pour les oiseaux sont très variables selon les espèces et les emplacements, de sorte que la littérature existante sur les parcs éoliens européens n'est pas appropriée pour évaluer les risques posés pour de nombreuses espèces d'oiseaux nord-américaines [83]. L'évaluation de la mortalité et des perturbations des espèces d'oiseaux dues aux parcs éoliens peut être difficile dans les zones extracôtières et nécessite l'utilisation de technologies de télédétection.

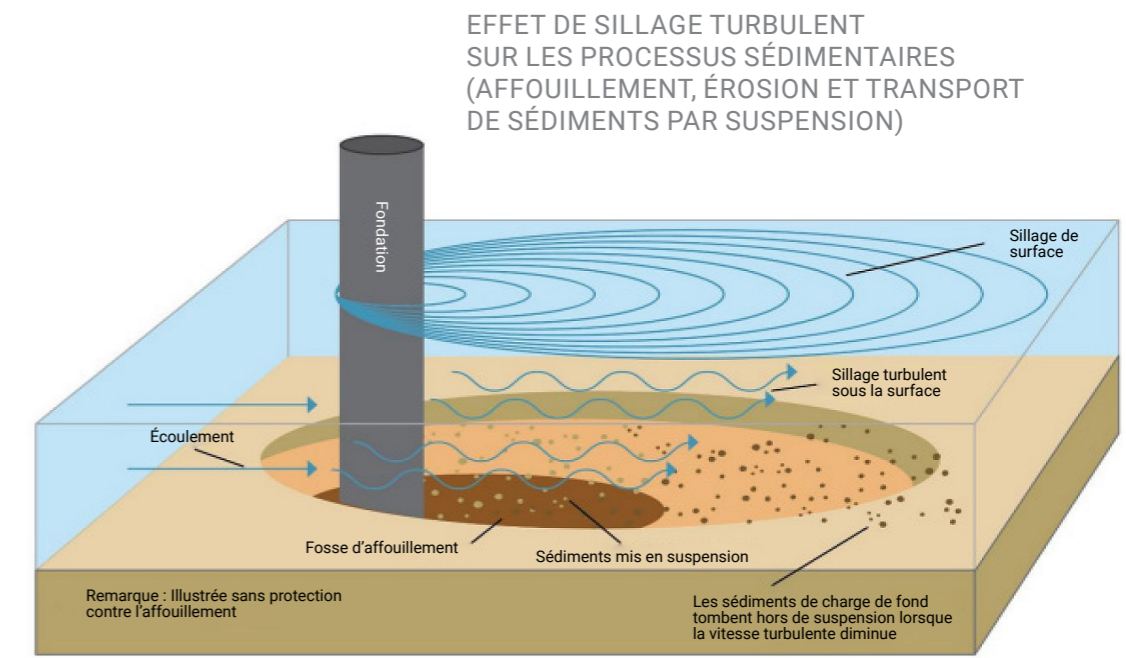
Pour leur part, les champs magnétiques émis par les câbles de transmission ne semblent pas avoir d'impact sur la faune marine [84].

3.1.3 Impact sur le milieu naturel

Les fondations des turbines peuvent modifier les courants aux sites des parcs éoliens en mer. Le mouvement accéléré de l'eau autour d'une structure immergée crée de la turbulence, ce qui est connu sous le nom d'effet de sillage marin (Figure 8), qui met des sédiments en suspension dans l'eau. Certaines espèces peuvent chercher refuge contre les courants dans les zones de sillage marin ou bénéficier d'une visibilité réduite en raison de la turbidité accrue, tandis que d'autres profitent de la concentration de proies dans les zones de turbulence [10]. La turbidité pourrait aussi affecter la flore en limitant la pénétration des UV nécessaires à la photosynthèse et donc affecter la production de phytoplancton et d'algues, souvent à la base de la chaîne trophique [85].

Les risques pour les oiseaux sont très variables selon les espèces et les emplacements, de sorte que la littérature existante sur les parcs éoliens européens n'est pas appropriée pour évaluer les risques posés pour de nombreuses espèces d'oiseaux nord-américaines [83].

Figure 8. Zone de sillage marin autour des fondations marines [10]



Des effets d'affouillement, variables selon le type de fondation, peuvent aussi apparaître. Dans l'ordre décroissant, les fondations les plus enclines à l'affouillement sont :

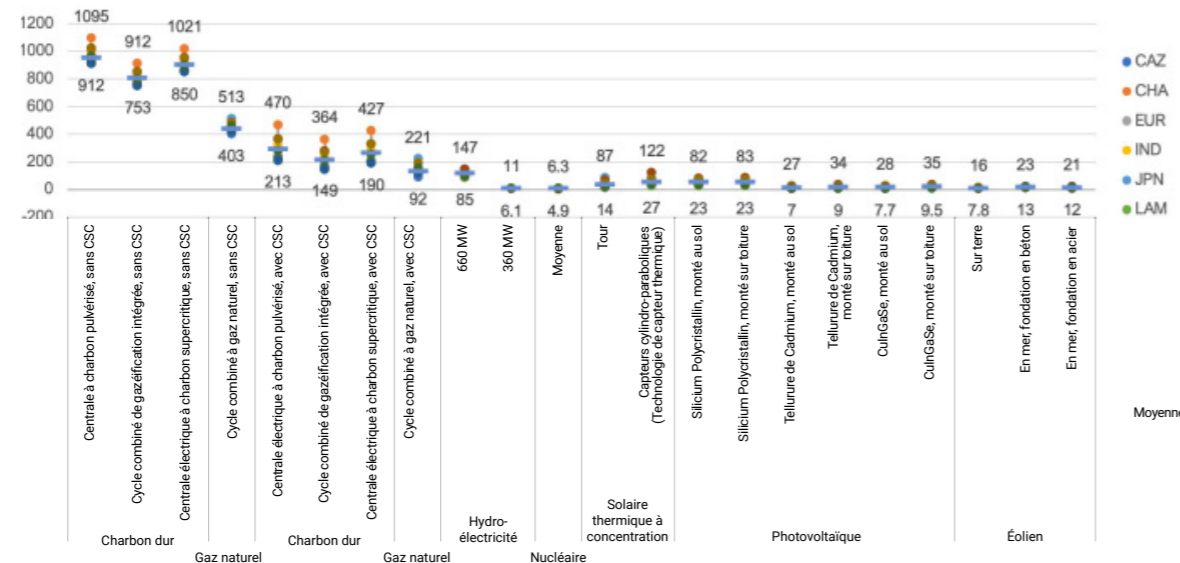
- Gravitaires;
- Caisson d'aspiration;
- Monopieu;
- Tripode;
- Treillis.

À noter que les fondations flottantes présentent le plus faible risque d'affouillement, car elles sont installées en eau profonde, où les courants sont généralement faibles.

3.1.4 Émissions GES de cycle de vie

La Figure 9 montre que la production d'électricité au moyen d'éoliennes est celle qui produit le moins de gaz à effet de serre (GES) parmi toutes les autres sources d'énergie renouvelable.

Figure 9. Émissions GES de cycle de vie des différentes technologies de production de l'électricité [76]



Cependant, l'éolien extracôtier produit légèrement plus de GES que son équivalent terrestre, à 21 contre 16 g d'éq. CO₂/kWh. La différence est principalement due au transport par bateau lors de l'installation et des opérations de maintenance [76]. La production de GES par les parcs éoliens en mer devrait baisser dans les années à venir, à mesure que la technologie des plateformes flottantes se développe et se répand. Près de 90 % de la masse du matériel utilisé dans les éoliennes et leur fondation est techniquement recyclable. Le recyclage des équipements en fin de vie permettrait de réduire l'empreinte carbone des équipements de 35 % [86]. Toutefois, le taux de recyclage demeure faible, entre autres parce que les technologies de recyclage ne sont pas toujours disponibles localement et parce qu'il n'y a pas de cible réglementaire. La pale, faite en composite, est présentement la partie la plus difficile à recycler, mais plusieurs manufacturiers travaillent pour la rendre recyclable [87].

Malgré le fait que près de 90 % de la masse du matériel utilisé dans les éoliennes et leur fondation soit techniquement recyclable, le taux de recyclage demeure faible en raison de l'absence de technologies de recyclage disponibles localement et de l'absence de cible réglementaire.

3.2 Impact sur les activités socioéconomiques

Les mers sont des milieux ouverts où se déroulent de nombreuses activités socioéconomiques, comme la pêche, l'extraction énergétique (vent, gaz, etc.) et le tourisme, qui doivent coexister dans le même espace. Certains pays ont donc mis en place des planifications spatiales marines (PSM) afin de gérer ces interactions.

CanmetÉNERGIE a réalisé récemment un recensement des PSM de plusieurs pays afin d'évaluer les interactions entre l'éolien extracôtier et les autres activités [88]. Ces PSM prévoient l'exclusion de la navigation commerciale dans les zones désignées pour l'éolien extracôtier. Cependant, la pêche et les activités touristiques sont souvent autorisées, sous conditions. Dans certains cas, aucune priorité entre l'éolien extracôtier et ces deux autres activités n'a été établie. Généralement, une zone tampon de sécurité est suggérée autour des éoliennes [89]. Pour sa part le Canada n'a pas de PSM nationale, mais des PSM sont en élaboration dans cinq biorégions marines, dont celle de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent.

3.2.1 Impact sur la pêche commerciale

On a vu précédemment (section 3.1) que l'éolien extracôtier pouvait avoir un impact négatif sur les écosystèmes, surtout pendant la phase de construction, quand le bruit et l'augmentation de la turbidité peuvent faire fuir les espèces marines, mais aussi un impact positif durant la phase d'exploitation, en fournissant un récif artificiel propice au développement de la vie marine.

En ce qui concerne la pêche, l'introduction d'éoliennes en mer inquiète beaucoup les pêcheurs commerciaux. Aux Pays-Bas, des pêcheurs se sentent progressivement exclus de leurs zones de pêche traditionnelles [90] tandis qu'en France des comités régionaux des pêches entament régulièrement des actions en justice contre les parcs proposés [91]. Aux États-Unis, la *Responsible Offshore Development Alliance*, une coalition d'associations de pêcheurs, considère qu'elle est écoutée seulement pour la forme, sans que ses avis soient pris en compte [92]. En plus des pertes économiques, les pêcheurs peuvent ressentir une perte de leurs repères culturels et sociaux s'ils doivent abandonner une activité traditionnelle exercée dans leur communauté et leur famille depuis plusieurs générations.

Le principal problème vécu par les pêcheurs est que la pêche est limitée ou interdite à proximité et dans les parcs d'éoliennes en mer. En particulier, il est impossible de pêcher dans la zone tampon de sécurité d'une éolienne, et il y a des restrictions sur l'installation de certains équipements passifs de pêche (notamment des casiers) en plus d'une interdiction de pêcher au chalut. Face à cela, certains pêcheurs déplacent leurs activités hors du parc éolien, ce qui peut générer de la compétition avec d'autres pêcheurs et causer de la surpêche dans ces endroits. Une étude basée sur une modélisation numérique du comportement des écosystèmes montre que les impacts négatifs sur les activités de pêche peuvent être atténués par une augmentation des captures (jusqu'à 7 %) à proximité des parcs éoliens à cause de l'afflux de poisson près des structures et par de légères modifications dans la composition des captures. La création de plateformes à usages multiples, qui intégrerait entre autres l'aquaculture aux fondations des éoliennes en mer, est une autre approche actuellement à l'étude qui vise la cohabitation entre plusieurs activités dans le parc [93]–[95].

Le développement obligatoire de PSM est l'une des façons mises de l'avant par la Commission européenne d'assurer une bonne collaboration entre les différentes parties prenantes [89]. Le processus de consultation consiste à déterminer les meilleures zones de pêche pour éviter d'y implanter un parc d'éoliennes en mer. Il s'agit aussi d'un forum pouvant servir à déterminer des paramètres d'une cohabitation entre les deux activités. Au Royaume-Uni, un bureau de liaison entre les industries de l'éolien extracôtier et de la pêche (FLOWW) a été mis en place dès 2002, pour créer un forum de discussion et fournir des guides de meilleures pratiques [96]. Steins *et al.* [97] ont pour leur part analysé la communauté de pratique pour la mer du Nord qu'ont mise en place les Pays-Bas, et ils proposent 10 lignes directrices pour améliorer ce modèle de forum multipartite.

Le développement obligatoire de planifications spatiales marines est l'une des façons mises de l'avant par la Commission européenne d'assurer une bonne collaboration entre les différentes parties prenantes [89].

3.2.2 Impact sur le tourisme et le transport maritime

Le tourisme côtier peut prendre plusieurs formes : plage, pêche récréative, navigation de plaisance, ou simple envie de profiter de la vue sur la nature. Même si les parcs d'éoliennes en mer n'entravent pas directement ces activités, ils peuvent néanmoins créer des nuisances visuelles qui peuvent inquiéter les professionnels du tourisme locaux. Aucun impact négatif n'est cependant démontré dans la littérature [98]. Dans des sondages [99]–[101], la majorité des répondants ont une attitude neutre envers les parcs, tandis que les autres sont partagés entre attitude positive et attitude négative. Les attitudes sont plus négatives quand le parc est situé à moins de 10 km de la côte. Une étude menée quelques années après la mise en service du parc de Block Island aux États-Unis montre même une augmentation du nombre de nuitées réservées sur Airbnb [102]. Les études [103], [104] montrent aussi que l'opinion des individus sur le changement climatique en général et sur l'éolien extracôtier en particulier joue un rôle déterminant sur leur attitude envers les parcs lors de leur visite touristique. Le type de touriste pourrait donc changer. En ce sens, plusieurs municipalités situées près des parcs ont mis en place divers services comme des centres d'information, ou proposent des excursions afin d'inclure les parcs dans leur offre touristique [105].

En ce qui concerne le transport maritime, l'introduction de parcs d'éoliennes en mer impose des changements à l'industrie, mais ne cause pas d'impact négatif sévère ni permanent. Afin d'éviter des accidents avec les éoliennes, les routes de navigation doivent être modifiées, ce qui nécessite des mises à jour des cartes de navigation et l'ajout de bouées. Certains pays ferment complètement toute la zone du parc au transport maritime, tandis que d'autres permettent la circulation. Une PSM en amont de la construction des parcs permet de minimiser les conflits. La modification des routes entraîne les conséquences suivantes [106] :

Augmentation du temps de transport :

- Augmentation de la consommation de carburant;
- Augmentation des heures de travail pour l'équipage;

Augmentation du risque de congestion :

- Risque de pénalité pour retard;
- Augmentation du coût des assurances, car risque d'accidents accru.

Un risque plus important a cependant été soulevé récemment par les *National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine* aux États-Unis. Leur étude [107] indique que les champs magnétiques des générateurs ainsi que la rotation des pales créent des interférences qui peuvent perturber les systèmes radars Doppler, ce qui pourrait mener à des collisions.

3.3 Aspects réglementaires de l'éolien extracôtier

3.3.1 Contraintes et restrictions

Le Canada a adopté en 2019 la *Loi sur la Régie canadienne de l'énergie* (LRCE) [108], qui établit la compétence de la nouvelle Régie de l'énergie du Canada (REC) à l'égard des projets d'énergie renouvelable en mer [109].

Des travaux en vue d'étudier l'opportunité et la réglementation d'intégration des projets d'éolien extracôtier sont en cours. Un document de propositions sur les exigences techniques est d'ailleurs en phase de consultation [110]. De plus, un étalonnage à l'échelle internationale a été élaboré [88]. Ce dernier a permis de déterminer les exclusions courantes d'installation d'éoliennes en mer :

- Couloirs de navigation;
- Zones existantes d'éolien extracôtier;
- Pipelines et câbles de transmission sous-marins;
- Aires environnementales protégées;
- Extraction pétrolière et gazière;
- Activités militaires;
- Munitions non explosées;
- Sites d'élimination de déchets;
- Stockage de CO₂;
- Aéroport;
- Évaporite minérale.

Les restrictions, aussi appelées considérations prioritaires, n'interdisent pas nécessairement davantage d'activités, mais peuvent impliquer certaines contraintes ou conditions. Les restrictions courantes comprennent :

- Pêche;
- Aquaculture;
- Loisirs et tourisme;
- Patrimoine;
- Recherche scientifique.

3.3.2 Cadre réglementaire au Canada

En 2022, la réglementation qui s'applique fait référence à des lois et textes d'application impactant le développement de l'éolien extracôtier comme la zone économique exclusive (ZEE), à la Loi sur les océans et à la Loi sur la Régie canadienne de l'énergie.

3.3.2.1 Propriétés du territoire

D'après la *Loi sur les océans* [111], dans tout espace maritime qui n'est pas compris dans le territoire des provinces, les fonds marins et le sous-sol marin, ainsi que toutes leurs ressources vivantes ou non vivantes, sont la propriété de l'État fédéral. Toutefois, dans le cas de l'exploitation pétrolière extracôtière, les provinces (Terre-Neuve-et-Labrador et Nouvelle-Écosse dans les années 1980, Québec dans les années 2000 [112]) ont contesté la propriété exclusive du gouvernement fédéral des ressources et des revenus liés à leur exploitation. Trois accords fédéraux-provinciaux, un pour chaque province, ont donc été conclus pour spécifier les droits et responsabilités de chacun, harmoniser les évaluations environnementales et déterminer le partage des revenus. Ces accords s'appliquent cependant seulement pour l'extraction des hydrocarbures. Une modification à ces accords, ou de nouveaux accords, pourrait être nécessaire afin de clarifier les rôles des différents paliers de gouvernement dans le cas du développement de l'éolien extracôtier.

La *Loi sur les océans* divise les espaces maritimes en deux parties : les eaux intérieures et territoriales et la zone économique exclusive (ZEE). Le Canada exerce sa pleine souveraineté, comme il le fait sur le territoire terrestre, dans les eaux intérieures (dont le golfe du Saint-Laurent) et dans les eaux territoriales (qui s'étendent jusqu'à 12 milles nautiques des côtes). Le Canada doit cependant laisser le droit de passage innocent aux navires étrangers dans ses eaux territoriales. La ZEE, qui s'étend jusqu'à 200 milles nautiques des côtes, est toutefois une zone internationale. La Convention des Nations unies sur le droit de la mer [113] donne des droits souverains au Canada pour ce qui est d'exploiter les ressources qui s'y trouvent, y compris la ressource éolienne, et donne au Canada la compétence pour protéger le milieu marin. Par contre, les autres États doivent pouvoir y circuler librement, ce qui comprend la circulation de navires (notamment des sous-marins), le passage d'oléoducs et autres formes de transport.

Les parcs éoliens extracôtiers occupent un espace important. Les 174 éoliennes du parc Hornsea 1 [114] au Royaume-Uni, le plus grand en mer du Nord avec sa capacité de production de 1,2 GW, couvrent plus de 400 km². En comparaison, la plus large plateforme pétrolière en mer du monde n'occupe que 1,2 km², incluant une zone de sécurité de 500 m autour de la plateforme [115]. Malgré leur taille, les futurs parcs éoliens extracôtiers devront être disposés de manière à ne pas entraver la libre circulation dans la ZEE.

3.3.2.2 Lois environnementales

La *Loi sur les océans* a divisé les océans et les Grands Lacs du Canada en 13 biorégions et prévoit entre autres la protection de certaines zones marines :

- **Aires marines protégées**

Une aire marine protégée (AMP) (aussi appelé zone de protection marine) est une zone définie par la *Loi sur les océans* du Canada qui est légalement protégée et gérée pour assurer la conservation à long terme de la nature. Il existe actuellement 14 AMP au Canada, qui représentent plus de 6 % des zones marines et côtières du Canada, situées à la fois dans la mer territoriale et dans la zone économique exclusive du Canada. Les AMP offrent une protection juridique pour une gamme d'espèces, d'habitats et de caractéristiques de diverses activités, les normes actuelles des AMP interdisant spécifiquement quatre activités industrielles dans les nouvelles AMP fédérales : les activités pétrolières et gazières, l'exploitation minière, le déversement et le chalutage de fond.

Comme pour l'extraction pétrolière extracôtière, des accords fédéraux-provinciaux pourraient être nécessaires afin de clarifier les rôles des différents paliers de gouvernement dans le cas du développement de l'éolien extracôtier.

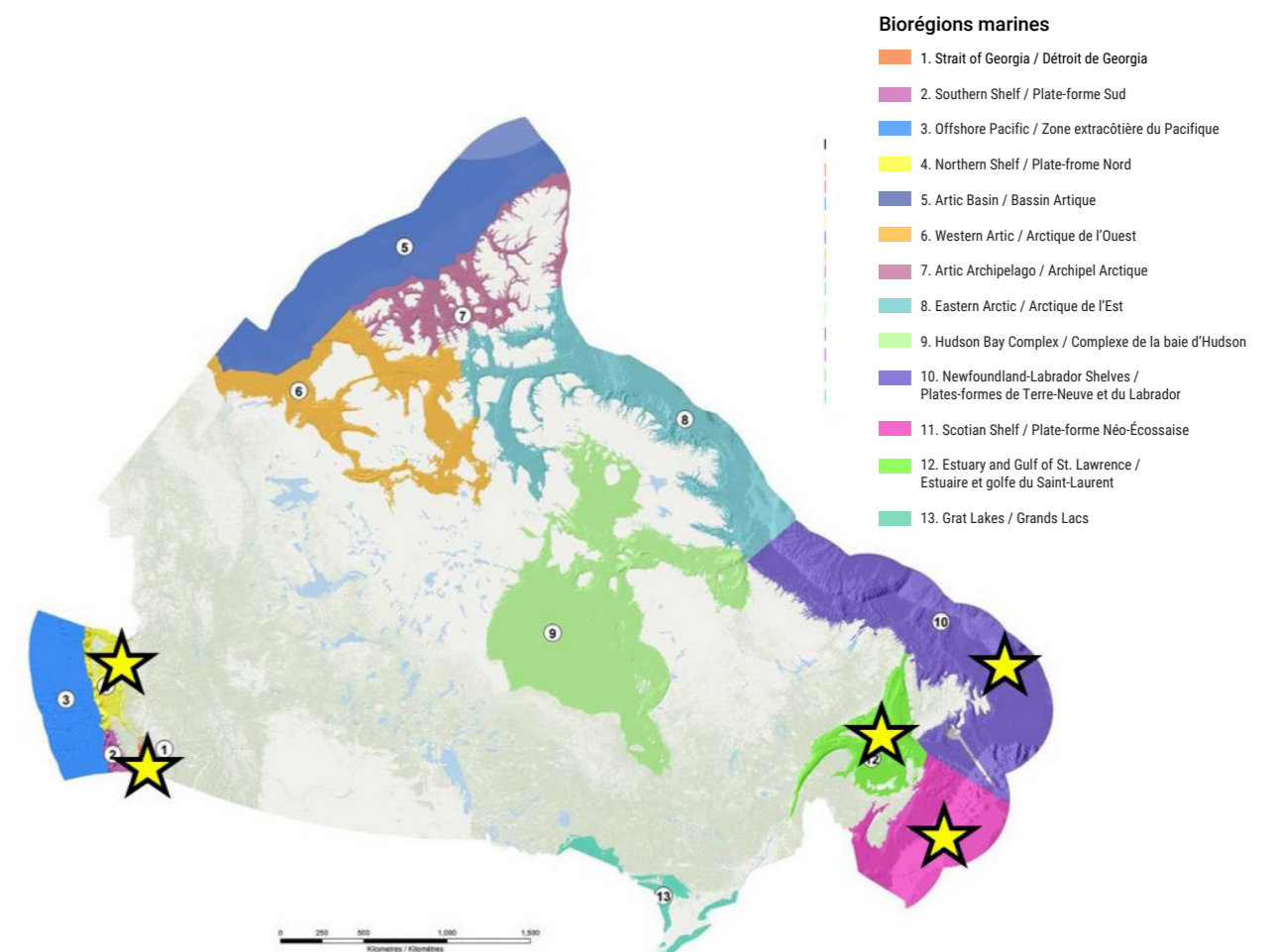
- **Zones d'importance écologique et biologique**

Une zone d'importance écologique et biologique (ZIEB, ou EBSA en anglais) est une zone des océans du Canada qui a été identifiée comme ayant une importance biologique ou écologique particulière au moyen d'une évaluation scientifique. Bien que les zones qui ne sont pas définies comme ZIEB ne doivent pas être considérées comme sans importance écologique, le statut de ZIEB indique que toute activité entreprise dans une telle zone doit tenir compte de précautions supplémentaires pour éviter les risques pour les sensibilités écologiques de la zone.

Cinq biorégions marines (marquées par une étoile jaune sur la Figure 10) ont des AMP qui sont en cours d'élaboration [116] :

1. Le détroit de Géorgie;
2. La plateforme Nord;
3. L'estuaire et le golfe du Saint-Laurent;
4. La plateforme néo-écossaise;
5. Les plateformes de Terre-Neuve-et-Labrador.

Figure 10. Cartes des biorégions marines du Canada montrant les AMP en cours d'élaboration [117]



De plus, le MaPP (Partenariat de planification marine pour la côte nord du Pacifique du Canada) [118] a été élaboré grâce à la collaboration entre la Colombie-Britannique et 16 Premières Nations membres, et est divisé en quatre sous-régions : Haida Gwaii, la côte Nord, la côte Centrale et le nord de l'île de Vancouver. Les plans du MaPP donnent des recommandations pour l'utilisation, le développement et la protection des zones principales dans leurs sous-régions respectives. Bien que les PSM de l'actuel MaPP soient en grande partie axés sur la protection environnementale, la PSM pour Haida Gwaii établit une zone de gestion spéciale pour le développement de l'énergie renouvelable. En avril 2019, de nouvelles normes pour les AMP ont été annoncées, à savoir l'interdiction de mener les activités suivantes dans ces zones :

- Pétrole et gaz;
- Exploitation minière;
- Immersion en mer;
- Chalutage de fond.

Autres outils législatifs et réglementaires pour l'établissement des aires conservées :

Pêches et Océans Canada

- AMP
- Refuges marins établis en vertu de la *Loi sur les pêches*
- AMCEZ pouvant être ajoutées

Environnement et Changement climatique Canada

- Réserves nationales de faune marine
- Parties marines des refuges d'oiseaux migrateurs et des réserves nationales de faune

Agence Parcs Canada

- Aires marines nationales de conservation
- Parties marines des parcs nationaux

Provinces et territoires

- Au moyen de leurs propres mécanismes législatifs

Gouvernements et groupes autochtones

- Potentiel pour les aires marines protégées et conservées autochtones





4. Portrait international

L'industrie de l'éolien extracôtier demeure petite en comparaison de l'éolien terrestre, mais est en pleine expansion. Limitée à l'Europe du Nord durant la majorité des années 2010, elle est maintenant en forte croissance en Asie, particulièrement en Chine, et les États-Unis y accordent de plus en plus d'intérêt. Cette section, divisée en trois parties, fait le portrait de cette industrie dans le monde. La première partie fait un résumé des puissances installées et projetées. La deuxième partie présente des exemples de parcs opérationnels d'éoliennes en mer pertinents pour le contexte canadien. Les coûts et le soutien des États sont discutés dans la troisième partie.

4.1 État actuel de l'industrie

L'éolien extracôtier est encore une source marginale de production d'électricité qui est utilisée commercialement dans moins de douze pays. Avec 57 GW de puissance installée dans le monde (Figure 11) à la fin de 2021, elle représente seulement 7 % de la puissance installée de l'énergie éolienne dans le monde. Toutefois, les 21 GW d'éoliennes en mer ajoutés en 2021 ont représenté 22,5 % de la puissance éolienne ajoutée durant l'année. Le Global Wind Energy Council (GWEC) s'attend à ce que l'éolien extracôtier conserve cette part des installations d'ici 2026 grâce à l'ajout de 90 GW de puissance entre 2022 et 2026 [119]. Le département de l'énergie des États-Unis recensait 25 GW en construction dans le monde à la fin de 2021, principalement en Chine et au Royaume-Uni, et indiquait que plusieurs projets totalisant 79 GW avaient déposé des demandes de permis auprès d'un organisme de régulation [9].

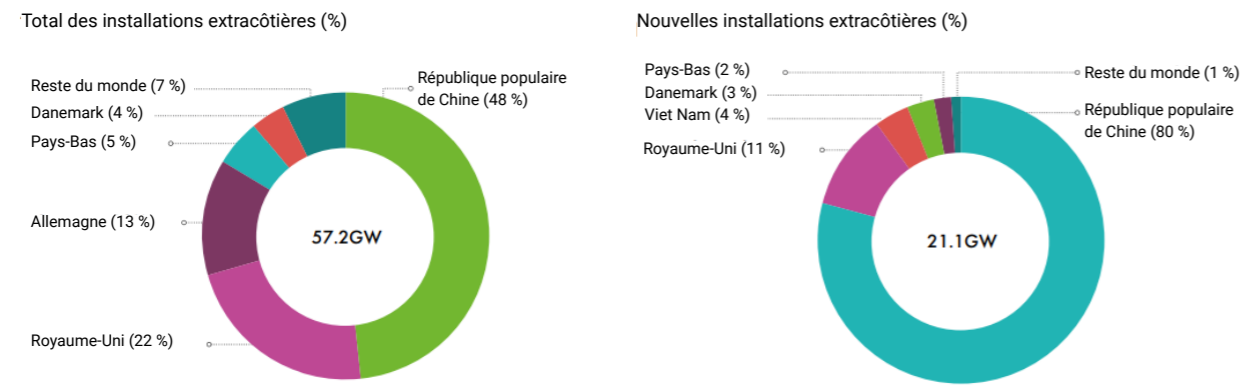
La Chine est devenue le premier producteur mondial d'énergie venant d'éoliennes en mer en 2021 grâce à l'ajout de près de 17 GW. Avec environ 28 GW de puissance installée, l'éolien extracôtier représente maintenant près de 1 % [119], [120] de toute la capacité de production électrique de la Chine. L'Europe, plus particulièrement les pays bordant la mer du Nord, est le seul autre grand producteur. L'éolien extracôtier y joue cependant un rôle plus important, puisqu'il représentait 15 % de la capacité de production électrique installée au Danemark et 8 % au Royaume-Uni en 2018 [121].

.....

Les 21 GW d'éoliennes en mer ajoutés en 2021 ont représenté 22,5 % de la puissance éolienne ajoutée durant l'année.

.....

Figure 11. Puissance de l'éolien extracôtier installée au 1^{er} janvier 2022.



Gauche : totale; droite : en 2021 uniquement (p. 109 de [119])

Des projections venant de trois sources indépendantes [9], [50], [122] prévoient que la puissance totale installée de l'éolien extracôtier en 2030-2031 atteindra entre 228 et 286 GW. L'industrie devrait donc installer en 10 ans l'équivalent de quatre fois la puissance actuelle. Les projections indiquent que l'Europe sera le principal moteur de ce développement, mené entre autres par le Royaume-Uni, qui planifie d'augmenter sa puissance installée de 10 GW à 40 GW d'ici 2030. Bien que la Chine ait retiré les subventions à l'éolien extracôtier dans son 14e plan quinquennal (2021-2025) pour l'énergie renouvelable, elle devrait continuer d'être un pôle majeur de développement de l'industrie. En effet, le nouveau plan quinquennal demande que l'énergie renouvelable comble au moins 50 % des nouveaux besoins en électricité. L'industrie est bien positionnée pour en profiter grâce à la baisse des prix de l'éolien extracôtier et à des subventions venant des provinces. Finalement, l'éolien extracôtier devrait faire ses débuts dans certains pays, notamment les États-Unis et Taiwan. À plus long terme, l'IRENA prévoit que la puissance installée totale atteindra 1000 GW en 2050, soit un taux de croissance annuel moyen de 12 %.

Comme le démontre le Tableau 3, Siemens Gamesa et Vestas ont été les deux principaux fabricants d'éoliennes en mer entre 1995 et 2018, quand l'Europe du Nord était le principal marché. Depuis, la Chine est devenue le principal marché grâce à l'installation d'une puissance de 20 GW en 2020 et 2021. Ce développement rapide a particulièrement profité aux fabricants chinois.

L'IRENA prévoit que la puissance installée totale atteindra 1000 GW en 2050, soit un taux de croissance annuel moyen de 12 %.

Tableau 3. Part de marché des fabricants d'éoliennes en mer

	1995-2018 (MW) [121]	Part de marché 1995-2018	2019-2021 (MW) [123]-[125]	Part de marché 2019-2021
Siemens Gamesa	13881	65 %	6340	25 %
Vestas (MHI)	3882	18 %	1680	7 %
Envision	804	4 %	2350	9 %
Goldwind	574	3 %	3340	13 %
Mingyang	113	1 %	5220	20 %
Sewind¹	306	1 %	6420	25 %
GE Renewable Energy	177	1 %	270	1 %
Taiyan	10	0 %	0	0 %
Senvion	1253	6 %	0	0 %
Bard	405	2 %	0	0 %

1. Incluant les turbines Siemens Gamesa produites sous licence

Siemens Gamesa et Vestas demeurent actives dans la plupart des marchés. Pour leur part, les compagnies chinoises (Envision, Goldwind, Mingyang et Shanghai Electric [Sewind]) ont été presque exclusivement actives dans leur marché national, mais cherchent à se développer à l'international [126], [127].

À l'exception d'Envision, ces principaux fabricants ont tous récemment dévoilé leur nouvelle génération d'éolienne en mer, capable d'atteindre une puissance avoisinant les 15 MW (Tableau 4). Actuellement à l'essai, ces turbines devraient être commercialisées à partir de 2024. GE et Siemens Gamesa (SGRE) ont résolu à l'amiable tous leurs litiges concernant les brevets de technologie d'éoliennes aux États-Unis et en Europe, selon des termes confidentiels. Ils se sont également accordés à eux, ainsi qu'à leurs filiales respectives dans le monde, des licences croisées sur les familles de brevets en question, pour toute la durée de ces familles de brevets [129].

Tableau 4. Plus récent modèle d'éolienne en mer annoncé par les principaux manufacturiers

	Modèle	Puissance (MW)	Longueur de pale (m)	Prototype installé
Siemens Gamesa	SG 14-222 DD	14	108	2021
	SG 14-236 DD	14	115	2022
Vestas (MHI)	V236-15.0 MW	15	115.5	2022
Envision	Pas de modèle dans cette catégorie			
Goldwind	GWH 242-12MW	12	242 (diamètre)	N/D
Mingyang	MySE 16.0-242	16	118	2023
Sewind¹	S112	N/D	112	N/D
GE Renewable Energy	GE Haliade-X	14	107	2019 (12 MW)

1. Indépendamment de Siemens Gamesa

4.2 Parcs dans le monde

Cette section présente des exemples de parcs éoliens marins existants dont le Canada pourrait s'inspirer.

Tahkoluoto wind farm – Parc en mer givrante [54], [130]

Lieu	Tahkoluoto, Finlande
Caractéristique particulière	Premier parc d'éoliennes en mer à être installé dans une mer qui se couvre de glace en hiver
Début des opérations	2017
Turbines	1 x 2.3 MW Siemens avec diamètre de 101 m (démonstrateur 2010) 10 x 4.2 MW Siemens-Gamesa avec diamètre de 130 m
Puissance / Facteur d'utilisation (F.U.)	42 MW / 43 %
Type de fondation	Fixe – gravitaire en acier
Profondeur d'eau	10-50 m
Vitesse du vent à 100 m	9 m/s
Coût de construction (CAPEX)	120 M€; 2857 €/kW (démonstrateur non compris) (134,2 M USD; 3195 USD/kW)
Information supplémentaire	Un plan d'expansion du parc a été déposé pour évaluation en 2021. Puissance additionnelle : 300-500 MW Jusqu'à 45 turbines de 11-16 MW Début prévu de construction : 2023



Hywind – Parc ayant des conditions similaires au golfe du Saint-Laurent [28], [131]

Lieu	Peterhead, Écosse (R.-U.)
Caractéristique particulière	Vitesses de vent similaire à celles rencontrées dans le golfe du St-Laurent
Début des opérations	2017
Turbines	5 x 6 MW Siemens avec diamètre de 154 m
Puissance / F.U.	30 MW / 52,6 %
Type de fondation	Flottante – bouée espar
Profondeur d'eau	95-120 m
Vitesse du vent à 100 m	10 m/s
Coût de construction (CAPEX)	2 MM NOK (242,2 M USD; 8073 USD/kW)
Information supplémentaire	A atteint un facteur d'utilisation de 57,1 % durant les 12 mois finissant en mars 2020. Maintient un F.U. > 90 % beaucoup plus souvent que les autres parcs au Royaume-Uni.

Vineyard Wind Farm – Premier parc commercial prévu en Amérique du Nord [132], [133]

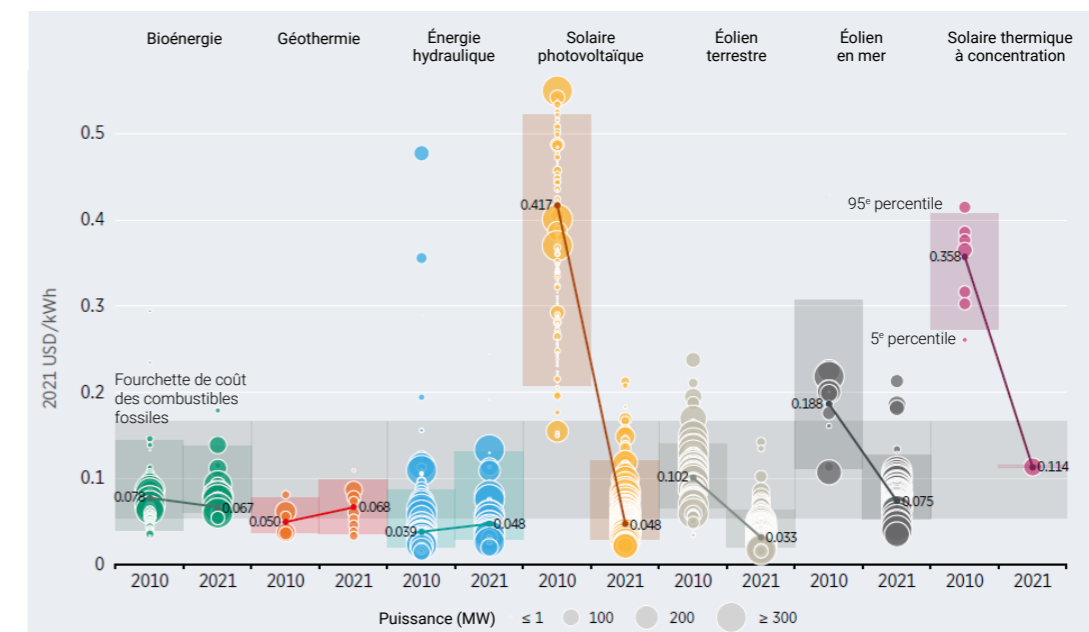
Lieu	Vineyard, Massachusetts, États-Unis
Caractéristique particulière	Premier parc commercial prévu en Amérique du Nord
Début des opérations	Attendu 2023
Turbines	62 x 13 MW General Electric avec diamètre de 220 m
Puissance / F.U.	800 MW / 45%
Type de fondation	Fixe – monopieu
Profondeur d'eau	42 m
Vitesse du vent à 100 m	9,3 m/s
Coût de construction (CAPEX)	2,3 MM USD; 2875 USD/kW

4.3 Coûts

4.3.1 Évolution des coûts

Le coût actualisé de l'énergie produite par les éoliennes en mer a fortement diminué au cours des 11 dernières années. Le coût actualisé de l'énergie permet d'exprimer le coût total de la construction et de l'opération des éoliennes par rapport à la quantité totale d'énergie qu'elles produiront durant leur vie. Selon l'IRENA [134], dont les données sont montrées à la Figure 12, le coût moyen des éoliennes de mer, à 75 USD/MWh, est maintenant similaire au coût moyen des centrales alimentées en énergie fossile. Le prix fluctue néanmoins beaucoup de projet en projet et est influencé principalement par les coûts en capital, soit par la turbine choisie ainsi que par la distance de la côte et la profondeur de l'eau.

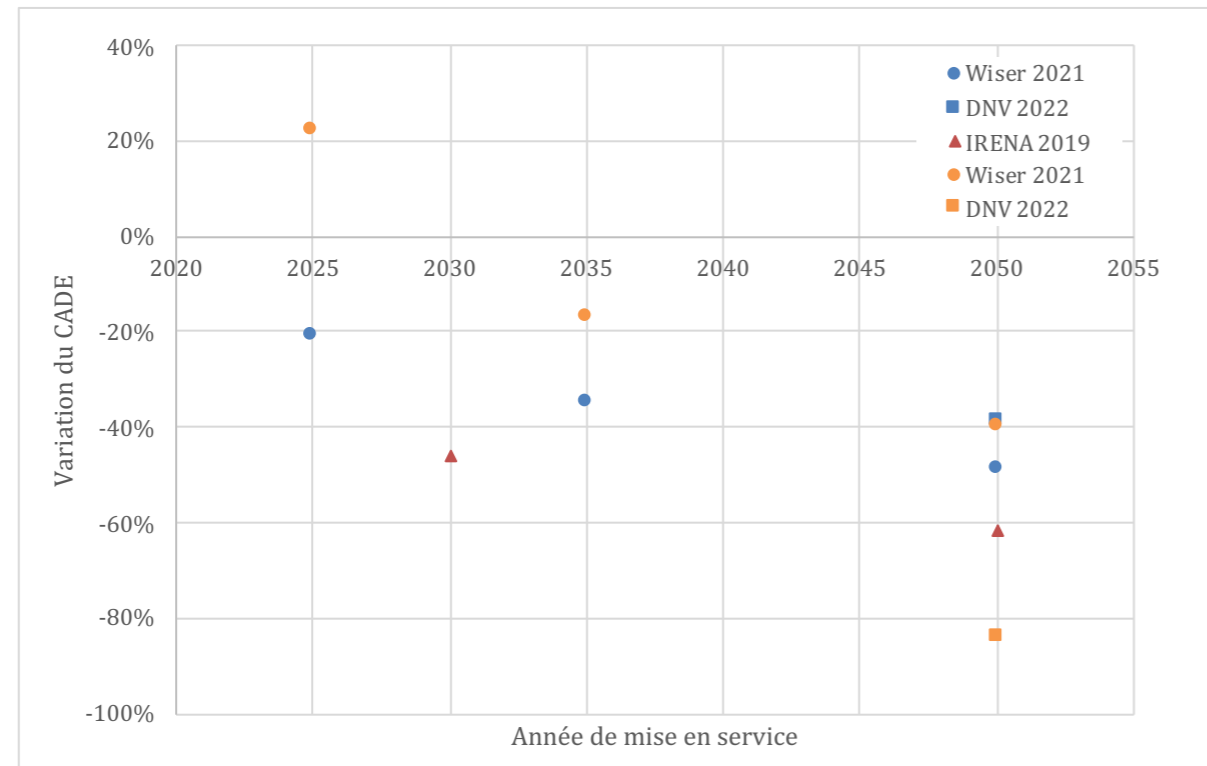
Figure 12. Comparaison dans le temps des CADE de plusieurs technologies de production d'électricité [134]



Cette réduction du CADE a été plus forte qu'anticipée. Les experts sondés par Wiser *et al.* [56] en 2014 anticipaient en effet que, dans un scénario optimiste, le CADE diminuerait entre 13-25 % entre 2014 et 2020. Plusieurs rapports internationaux publiés depuis 2020 ont plutôt rapporté une diminution de 28-49 % [56]. Plusieurs facteurs expliquent cette diminution rapide. Entre autres, l'industrie (plus particulièrement en matière de fondation fixe) a pris de la maturité et progressé sur sa courbe d'apprentissage au cours des dix dernières années, ce qui a diminué les risques financiers, permis la production en série dans la chaîne d'approvisionnement et réduit le temps d'installation (en jour/MW). De plus, la puissance moyenne des éoliennes extracôtées installées en 2020 a atteint 8 MW [119], une augmentation de 138 % par rapport à 2010. Déjà observée sur les éoliennes sur terre, la corrélation entre l'augmentation de la puissance des éoliennes et la diminution des coûts laisse entrevoir de futures baisses du CADE avec l'introduction prochaine de la nouvelle génération d'éoliennes de mer de 15 MW. Certaines prédictions de l'évolution du CADE à l'horizon 2050, par rapport à 2020 (2018 pour l'IRENA), sont présentées à la Figure 13.

Plusieurs rapports internationaux publiés depuis 2020 ont rapporté une diminution du CADE de 28-49 % entre 2014 et 2019 [56].

Figure 13. Évolution attendue du CADE d'ici 2050



Bleu : plateforme fixe; orange : plateforme flottante; rouge : plateforme non spécifiée
 Wiser2021 : [56], DNV2022 : [135], IRENA2019 : [50].

4.3.2 Le soutien des États

L'essor de l'industrie de l'éolien extracôtier malgré des prix initialement beaucoup plus élevés que ceux de l'électricité sur le marché a été possible grâce au soutien consenti par différents États. Les deux principaux moyens d'action de ces soutiens étaient de

- Créer un marché pour l'éolien extracôtier en établissant des cibles de puissance;
- Réduire le risque financier pour les investisseurs en leur garantissant un prix d'achat pour l'électricité produite par le parc.

L'éolien extracôtier est une technologie privilégiée par plusieurs pays côtiers afin d'atteindre leur objectif de zéro émission nette à l'horizon 2050-2060. En Europe, la guerre en Ukraine lancée en février 2022 par la Russie a amené plusieurs pays à accélérer et augmenter le déploiement des éoliennes en mer afin d'accroître leur indépendance énergétique. Le plan REPowerEU présente l'éolien extracôtier comme une opportunité majeure [136] tandis que la Déclaration d'Esbjerg vise à faire de la mer du Nord la centrale d'électricité verte de l'Europe [137]. Les objectifs de plusieurs pays sont présentés dans le Tableau 5. Ces cibles assurent un marché aux investisseurs, ce qui les incite à participer à la création d'une filière manufacturière locale.

Tableau 5. Objectifs de puissance de l'éolien extracôtier dans divers pays

Pays	Objectif (puissance installée totale)
Royaume-Uni [138]	50 GW d'ici 2030
Allemagne [139]	30 GW d'ici 2030 40 GW d'ici 2035 70 GW d'ici 2045
Danemark [140]	12,9 GW d'ici 2030
Pays-Bas [141]	21 GW d'ici 2030
France [142]	18 GW d'ici 2035 40 GW d'ici 2050
États-Unis d'Amérique [143]	30 GW d'ici 2030 110 GW d'ici 2050
Taiwan [144]	20,5 GW d'ici 2035
Vietnam [145]	7 GW d'ici 2030
Inde [146]	30 GW d'ici 2030
Japon [147]	10 GW d'ici 2030 30-45 GW d'ici 2040

Afin d'atteindre ces cibles, les États procèdent généralement à des appels d'offres auprès de promoteurs privés. Les appels d'offres indiquent la puissance totale qui sera autorisée et spécifient les zones où les éoliennes pourront être installées. En Europe, les pays impliquent toutes les parties intéressées (les promoteurs potentiels, les industries déjà présentes [pêche, tourisme, etc.], les groupes environnementaux et le public) dès la phase du choix des zones d'implantation. Le but est d'identifier très tôt dans le processus de planification les zones présentant le meilleur potentiel technique et économique tout en tenant compte des contraintes environnementales et sociales. À ce stade, puisqu'aucun projet n'est en cours, les promoteurs n'ont pas d'investissement à protéger et les différents acteurs locaux et environnementaux ne se sentent pas menacés par un projet actif. Les gagnants des appels d'offres doivent tout de même procéder et faire approuver des études et consultations détaillées spécifiques à leur projet, mais le risque de contestations et de mauvaises surprises est réduit, ce qui diminue les risques financiers et accélère le processus d'évaluation final. De plus en plus, les études d'impact environnemental détaillées du site exact où les éoliennes seront installées sont faites par les États avant même les appels d'offres [148].

Les cibles de puissance installée assurent un marché aux investisseurs, ce qui les incite à participer à la création d'une filière manufacturière locale.

Plusieurs types de soutien financier ont été mis en place afin de favoriser le développement des éoliennes en mer. Pendant longtemps, le système du tarif de rachat garanti (*feed-in tariff*, FiT) a été privilégié, entre autres par le Danemark, l'Allemagne et la Chine. Ce type de soutien fixe le volume et le prix de vente de l'électricité produite par le parc sur plusieurs années. La Commission européenne a toutefois demandé dès 2013 que les prix soient plus exposés aux conditions du marché [149]. La majorité des États européens se sont alors tournés vers le système de compléments de rémunération (*feed-in premium*, FiP) dans lequel les États versent un complément, fixe ou variable, au prix de vente obtenu sur le marché.

Avec la baisse du coût actualisé de l'éolienne en mer, ce type d'aide est de plus en plus abandonné. Certains pays ont complètement retiré leurs subventions et se fient sur un système de quota et de cibles, parfois combiné à un mécanisme d'échange de certificats, pour assurer le déploiement croissant de puissances d'énergies renouvelables. Toutefois, le contrat sur différence (*contract for difference*, CfD), utilisé au Royaume-Uni dès 2014, est le système présentement le plus populaire (Royaume-Uni, France, Danemark, etc.). Un CfD fixe le montant que le producteur recevra par kWh produit. Quand le prix de vente sur le marché est inférieur au prix entendu, l'État verse la différence sous la forme d'un complément de rémunération. Au contraire, le producteur verse la différence à l'État quand le prix de vente est supérieur au prix entendu.

Les contrats sont généralement attribués à la suite d'appels d'offres où le prix a longtemps été l'unique critère. Il y a maintenant des appels afin que d'autres critères soient pris en compte. Cette compétition pour offrir de bas prix nécessite que le prix des turbines baisse, ce qui crée une forte pression sur la chaîne d'approvisionnement. En 2021, quatre des cinq manufacturiers européens de turbines ont fonctionné à perte [150], ce qui a entraîné des fermetures d'usines et des pertes d'emplois. L'association WindEurope [151] demande que les gouvernements européens protègent la capacité manufacturière locale en incluant des critères autres que le prix, tels que des critères environnementaux.

L'obligation explicite de contenu local est interdite selon les règles du commerce de l'Organisation mondiale du commerce (OMC). Taïwan a néanmoins exigé dans son dernier appel d'offres que 60 % des biens et services nécessaires (excluant une liste de biens et services que Taïwan ne peut pas fournir de manière réaliste) viennent de Taïwan. La majorité des pays offrent plutôt des avantages aux développeurs de projets si un certain niveau de contenu local est atteint. Le Royaume-Uni a par exemple conclu une entente non contraignante en 2020 avec le secteur éolien extracôtier [152] dans laquelle le gouvernement s'engage à faire des appels d'offres massifs (total de 30 GW) et fréquents (aux deux ans, tous les ans depuis 2023) sur une période de 10 ans. En échange, le secteur s'engage à ce que 60 % de la valeur des projets viennent du pays. Dans leurs réponses aux appels d'offres, les développeurs doivent détailler leur plan concernant la chaîne d'approvisionnement. Ce plan, qui fait l'objet d'une évaluation pour déterminer l'admissibilité du développeur, doit notamment indiquer quelles composantes viendront du Royaume-Uni. Cette disposition est cependant contestée par l'Union européenne auprès de l'OMC [153]. Pour leur part, les États-Unis mettent en place un ensemble de subventions, programmes et crédits visant à favoriser le développement d'une industrie éolienne locale. Par exemple, les promoteurs peuvent avoir droit à un crédit de 20 % du prix du bail de parcelle de mer qu'ils ont gagné par enchère s'ils s'engagent à investir 80 % de ce crédit dans la formation du personnel et/ou dans le développement de la chaîne d'approvisionnement [154]. L'*Inflation Reduction Act* (2022) donne aussi droit à un crédit d'impôt si tout le fer ou l'acier d'une composante a été produit aux États-Unis [154]. L'exigence de contenu local peut aussi s'appliquer aux services connexes. Par exemple, aux États-Unis, le *Jones Act* exige que tout déplacement maritime entre deux points situés aux États-Unis (ce qui comprend le parc éolien) se fasse sur un bateau construit, possédé et exploité par des Américains.

Les contrats sont généralement attribués à la suite d'appels d'offres où le prix a longtemps été l'unique critère. Il y a maintenant des appels afin que d'autres critères soient pris en compte.

Chine

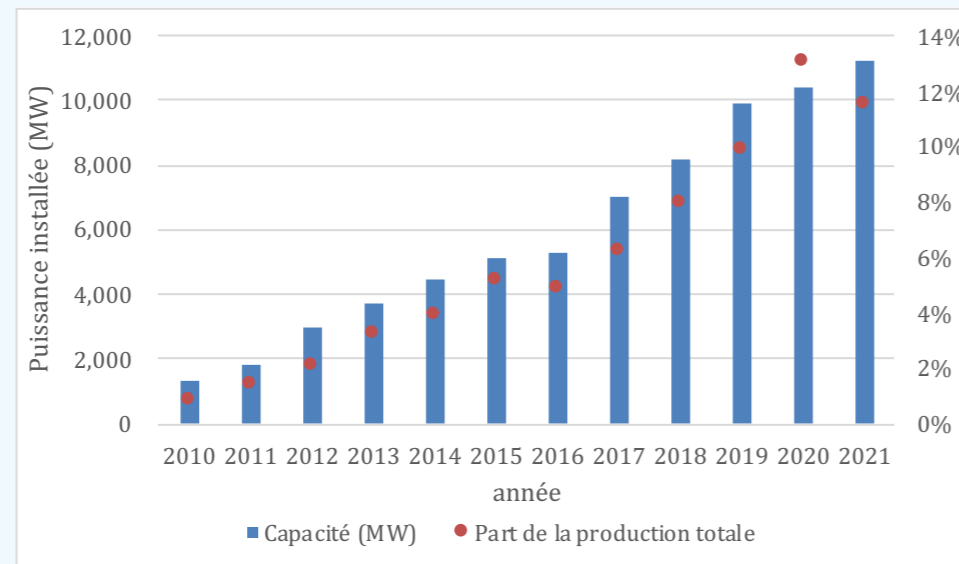
L'éolien extracôtier a pris son essor en Chine en 2014 lorsque le pays a mis en place un système de tarif d'achat après l'échec du précédent régime d'appels d'offres. Ce régime d'appels d'offres (2010-2014) avait permis d'octroyer quatre projets, mais leur réalisation a été retardée de sept ans principalement parce que les prix proposés étaient trop faibles. L'impressionnante quantité de puissance installée en Chine en 2021, qui lui a permis de devenir le pays avec le plus de puissance installée dans le monde avec un total de près de 27 GW [119], [155], est en grande partie due à l'abandon du système de tarif d'achat pour tous les parcs qui n'auront pas été opérationnels avant le 31 décembre 2021. Certaines provinces ont mis en place un système de subvention pour les éoliennes en mer installées entre 2022 et 2024 afin d'assurer une transition [156]. Depuis 2022, les projets retenus sont choisis par appel d'offres et le prix proposé compte pour au moins 40 % des points [157]. L'évaluation du prix est basée sur le prix du marché obtenu par les centrales au charbon. Toutefois, les provinces et les grands consommateurs ont maintenant une obligation minimale de consommation d'énergie renouvelable à respecter et cette obligation augmentera jusqu'en 2030. Ceux qui n'atteignent pas leur quota devront acheter des certificats d'énergie verte.

L'impressionnante quantité de puissance installée en Chine en 2021 lui a permis de devenir le pays avec le plus de puissance installée dans le monde avec un total de près de 27 GW [119], [155].

Royaume-Uni

Deuxième en potentiel technique [158] en Europe (derrière la Russie, mais dont le potentiel est dans les eaux glacées de l'Arctique), le Royaume-Uni, avec ses longues côtes donnant sur des eaux généralement peu profondes et libres de glace et ses lieux d'habitation et de consommation bien répartis, a été le pays avec le plus de puissance installée dans le monde de 2009 à 2020 [155], [159]. En 2021, le Royaume-Uni exploitait une puissance éolienne extracôtier de 11,3 GW, ce qui a produit 36,6 TWh d'énergie au cours de l'année. Cette production était suffisante pour alimenter 9,3 millions de foyers, soit le tiers des foyers du pays [160]. Entre 2019 et 2021, l'éolien extracôtier représentait plus de 10% de la production électrique totale du pays (Figure 14).

Figure 14. Évolution de la puissance installée de l'éolien extracôtier au Royaume-Uni et de sa part de la production totale d'électricité [161]



En 2021, le Royaume-Uni exploitait une puissance éolienne extracôtier de 11,3 GW, ce qui a produit 36,6 TWh d'énergie au cours de l'année. Cette production était suffisante pour alimenter 9,3 millions de foyers, soit le tiers des foyers du pays.

Fonctionnement [162]

1. Les promoteurs doivent tout d'abord gagner un bail, lors d'une mise aux enchères, sur une des parcelles de mer offertes par les sociétés d'État UK Crown Estate (TCE) et Crown Estate Scotland (CES), en Écosse. Les parcelles mises aux enchères ont préalablement fait l'objet d'études techniques, écologiques et économiques (navigation, pêches) par les sociétés d'État.
2. Les promoteurs doivent obtenir un ensemble de permis pour l'installation des turbines, la construction du câble de transmission se rendant à la côte et la connexion au réseau (durée estimée : 5 ans). Contrairement à plusieurs autres pays, ce sont les promoteurs qui doivent assumer le coût du raccordement au réseau électrique.
3. Les promoteurs doivent remporter une allocation de capacité de production lors d'une mise aux enchères pour un contrat sur différence (CfD). Ce contrat dure 15 ans.
4. Les promoteurs ont trois ans pour mettre en service la première phase (sur un maximum de trois) de leur parc d'éoliennes en mer.

Un historique des étapes importantes du développement de l'éolien extracôtier au Royaume-Uni a été compilé par le centre de recherche ORE Catapult [159]. En voici un court résumé :

- 2000 – Installation du premier projet de démonstration (2 x 2 MW);
- 2003 – Premier parc commercial (30 x 2 MW);
- 2010 – Premier parc de 100 éoliennes en mer et plus mis en service (100 x 3 MW);
- 2012 – premier parc de plus de 500 MW (140 x 3,6 MW). Plus de 1 GW installé en une année;
- 2015 – Première ronde d'enchères pour allocation de puissance avec le système de contrat sur différence (CfD), qui remplace le système de complément de rémunération. Les prix entendus varient entre 114 et 120 £/MWh¹ pour des projets à être livrés en 2019;
- 2017 – mise en service de du parc Hywind Scotland, premier projet commercial d'éolienne en mer flottante au monde. Deuxième ronde d'enchère pour allocation de puissance par CfD. Les prix entendus varient entre 57 à 75 £/MWh pour une mise en service en 2023;
- 2019 – Premier parc de plus de 1 GW mis en service (174 x 7 MW, total 1,2 GW). Troisième ronde d'enchères pour allocation de puissance par CfD : les prix entendus atteignent entre 39,65 et 41,61 £/MWh, soit un prix similaire au prix de l'électricité sur le marché entre 2015 et 2019 [163]. Annonce que deux projets seront faits sans CfD;
- 2020 – Approbation du projet de test et démonstration Erebus, un parc de sept à dix éoliennes flottantes totalisant 100 MW [164]. Mise en service prévue en 2026;
- 2022 – La quatrième ronde d'enchères pour allocation de puissance par CfD attribue un total de 7 GW à cinq projets d'éoliennes en mer à un prix entendu de 37,35 £/MWh. Un projet d'éolienne flottante de 32 MW en mer Celtique est aussi attribué, à un prix entendu de 87,30 £/MWh [165];
- 2023 – Les enchères pour allocation de puissance auront lieu chaque année [166].
- Perspectives et objectifs
- 2030 – Puissance installée prévue de 50 GW, dont 5 GW sur plateformes flottantes [138].

1. Tous les prix dans cette section sont ajustés à la valeur en 2012

France

Grâce à ses 3500 km de côtes réparties sur la façade atlantique, dans la Manche et dans la mer Méditerranée, la France métropolitaine possède le 6e meilleur potentiel technique en Europe [158]. Ce potentiel est estimé plus précisément à 80 GW pour l'éolien sur fondations fixes et à 140 GW pour l'éolien sur plateformes flottantes [167]. L'objectif du gouvernement actuel est d'avoir une puissance installée d'environ 5,5 GW en 2028, et de 40 GW répartie sur 50 parcs d'éoliennes en mer d'ici 2050 [142].

Néanmoins, la mise en service du premier parc commercial en France, composé de 80 éoliennes de 6 MW installées sur monopieu et situées à une quinzaine de kilomètres de Saint-Nazaire, n'a été complétée qu'à la fin de 2022 [168], [169]. Ce projet est l'un des six à avoir été attribués à la suite des deux premiers grands appels d'offres de 2011 et 2013, avec des tarifs d'achat variant entre 131 et 155 €/MWh. Ces six projets, qui donneront à la France une puissance légèrement inférieure à 3 GW, devraient tous être mis en service d'ici 2025 avec près de cinq ans de retard. Selon Michel Gioria, délégué général de France Énergie éolienne, ces retards sont dus à l'absence de planification à grande échelle. En conséquence, chaque projet est géré séparément et a généré beaucoup de recours juridiques [170].

Depuis 2015, la France a fréquemment remanié son cadre légal afin d'accélérer les projets et diminuer les coûts. Notons entre autres [171]–[173] :

- Le raccordement au réseau, y compris le poste électrique en mer, est pris en charge financièrement par le gestionnaire du réseau électrique et en bout de ligne payé par les consommateurs au moyen d'un tarif d'utilisation des réseaux publics électriques;
- Réalisation, d'ici 2024, d'une cartographie des zones maritimes les plus propices à l'installation d'un parc d'ici 10 ans;
- Les premières études techniques et environnementales, ainsi que la consultation du public, se font maintenant avant l'appel d'offres;
- Création du permis « enveloppe », dans lequel certaines caractéristiques du projet peuvent évoluer dans les limites définies par le permis;
- Tous les recours juridiques passent directement au Conseil d'État, tribunal administratif suprême qui n'offre pas de recours en appel (sauf rares exceptions).
- Passage du système de tarif d'achat vers le contrat sur différence (CfD).

Un projet de 0,6 GW a été attribué en 2019 à la suite du troisième appel avec un CfD dont le prix entendu est de 44 €/MWh. Depuis, la France lance des appels d'offres chaque année qui visent chaque fois à attribuer au moins 1 GW [142].

La France a aussi annoncé en 2016 la construction de quatre projets pilotes d'éoliennes flottantes. Le projet de Groix-Belle-Île en Bretagne a cependant été abandonné par ses promoteurs en novembre 2022, parce que sa viabilité économique n'était pas assurée [174]. Les trois autres projets, situés en mer Méditerranée, devraient être mis en service d'ici 2024. Puisque ce sont des projets de démonstration, ils bénéficient tous d'un soutien sous la forme d'un tarif d'achat de 240 €/MWh, et le raccordement au réseau est aux frais du promoteur [172]. Deux appels d'offres pour des parcs commerciaux d'éoliennes en mer flottantes, un projet de 250 MW en Bretagne et deux projets de 250 MW en Méditerranée, sont en cours avec des tarifs cibles de 120 et 110 €/MWh respectivement [175]. L'éolien sur plateformes flottantes concurrencera l'éolien sur fondations fixes à partir de 2024 [175].

Depuis 2015, la France a fréquemment remanié son cadre légal afin d'accélérer les projets et diminuer les coûts.

États-Unis

Le NREL estime le potentiel éolien en mer des États contigus aux États-Unis à plus de 4000 GW [176]. La vaste région du golfe du Mexique présente le meilleur potentiel total, mais les meilleurs vents soufflent dans l'Atlantique Nord (du Maine au New Jersey) et sur les Grands Lacs. Le potentiel de ces deux régions est estimé à 706 GW (dont 63 % sur plateformes flottantes) et 575 GW (dont 72 % sur plateformes flottantes), respectivement. Le potentiel sur la côte Ouest est faible et concentré aux côtes de l'Oregon (152 GW, 99 % à éoliennes flottantes), principalement à cause de la bathymétrie, mais aussi en raison de restrictions imposées par le département de la Défense.

Néanmoins, au 1er décembre 2022, il n'y avait que deux parcs actifs totalisant 0,042 GW de puissance. Deux autres parcs totalisant 0,932 GW sont toutefois en construction, et des plans de construction totalisant 18,6 GW sont en cours de révision [9]. Le gouvernement des États-Unis a annoncé en 2021 son intention d'avoir une puissance de 30 GW installée d'ici 2030, et de 110 GW d'ici 2050 [143]. À cette fin, le département de l'Énergie est en charge d'un projet visant à diminuer les coûts de l'éolien sur plateformes flottantes de 70 %, pour les ramener à 45 USD/MWh en 2035 [177]. Plusieurs États ont aussi leurs propres objectifs.

Afin de répondre à cette demande en puissance éolienne, une feuille de route détaillant le développement d'une chaîne d'approvisionnement locale est en préparation. Déjà, des entreprises canadiennes telles que Marmen (en association avec Welcon) et Technostrobe ont ouvert des usines à Albany (NY) afin de répondre aux besoins de ce marché.

Pour construire un parc, les promoteurs doivent tout d'abord gagner un bail, lors d'une mise aux enchères, sur une des parcelles de mer offertes par le Bureau of Ocean Management (BOEM). Le BOEM a annoncé en 2021 un plan visant à augmenter le nombre de mises aux enchères et à ouvrir des enchères dans plus de régions. Depuis les enchères de Carolina Long Bay en 2022, des points sont aussi attribués à des facteurs non monétaires tels que le développement de la main-d'œuvre, la chaîne d'approvisionnement ou les bénéfices locaux [9].

Le BOEM fait une étude environnementale et des consultations avec le public, les gouvernements et des promoteurs intéressés avant la mise aux enchères [9], [178]. Toutefois, contrairement à ce qui se fait dans plusieurs pays d'Europe, ces études et consultations ne sont pas exhaustives. Après avoir obtenu un bail, le promoteur doit faire approuver son plan d'études et de consultations par le BOEM. Le promoteur doit ensuite présenter ses résultats et son plan de construction au BOEM. La construction peut commencer si le plan est accepté.

Chaque État a son propre mécanisme pour l'achat de l'électricité produite par les éoliennes en mer [179], mais tous incluent le principe de l'échange de certificats d'énergie renouvelable (CER). Généralement, le promoteur vend son électricité et des CER à un tarif fixe par l'entremise d'un contrat d'approvisionnement d'électricité payé par un distributeur d'énergie qui revend ensuite les CER aux producteurs d'électricité non renouvelable. Dans d'autres États, le promoteur vend son électricité sur le marché et reçoit un paiement compensatoire (fixe ou variable) de la part de l'État si le prix était inférieur à un prix entendu (similaire à un CfD). L'État reçoit pour sa part des CER qu'il revend aux distributeurs d'énergie, lesquels sont obligés d'en acheter afin de montrer qu'une portion de l'électricité qu'ils distribuent vient de sources renouvelables.

La version préliminaire d'une modification réglementaire importante a toutefois été déposée pour consultation publique le 12 janvier 2023 [180]. Selon le département de l'Intérieur, les modifications permettront de simplifier plusieurs processus, de clarifier certaines règles et de diminuer les coûts de conformité [181].

Le gouvernement des États-Unis a annoncé en 2021 son intention d'avoir une puissance de 30 GW installée d'ici 2030, et de 110 GW d'ici 2050. [143]

4.3.3 Cas des parcs éoliens flottants

Les projets sur plateformes flottantes sont encore en phase de démonstration et comptent une petite dizaine de mégawatts répartis sur trois à cinq turbines par projet. Le coût actualisé de l'énergie du premier parc flottant, Hywind Scotland, construit en 2017, a été estimé à 248 USD/MWh, soit trois fois le prix d'un parc en mer typique [182]. Le parc de Kincardine (Écosse), qui est le plus grand parc d'éoliennes flottantes avec ses cinq éoliennes de 9,5 MW, a été connecté en 2021 après une construction qui aura coûté près de 82 USD/MWh [183]. Le NREL estimait en 2020 que, pour un même parc de référence de 75 éoliennes de 8 MW, le CADE d'un projet sur fondations flottantes s'élève à 129 USD/MWh, soit près de deux fois plus que les 77 USD/MWh estimés pour un projet sur fondations fixes [14]. Les États ont mis en place différents programmes de financement de recherche et de développement afin d'accélérer le développement de nouvelles technologies et de réduire les coûts des parcs éoliens extracôtiers flottants, tels que le Wind Shot aux États-Unis [177] et le Floating Offshore Wind Demonstration Programme au Royaume-Uni [184].





5. Potentiel de l'éolien extracôtier au Canada

5.1 Potentiel éolien

Cette section passe en revue les principaux aspects qui concernent la possibilité d'installer des parcs d'éoliennes en mer dans les trois régions côtières habitées du Canada : l'Atlantique, le Pacifique et les Grands Lacs.

5.1.1 Dans l'Atlantique

Vents

La portion canadienne de l'Atlantique possède l'un des meilleurs potentiels éoliens au monde. À l'exception des zones situées tout près de la côte, la vitesse moyenne des vents à 80 m au-dessus du niveau de la mer est généralement supérieure à 9 m/s [44]. Même en été, alors que les vents sont à leur plus faible, ils sont typiquement supérieurs à 8 m/s. Selon les données du Global Wind Atlas [60], ces vitesses de vent sont similaires à celles observées en mer du Nord, qui est la région comptant le plus d'éoliennes en mer.

La région essuie régulièrement des tempêtes, que ce soient des ouragans au début de l'automne ou des tempêtes hivernales du nord-est accompagnées par de fortes rafales pouvant dépasser les 25 m/s (90 km/h) [185]. À ces vitesses, les éoliennes doivent généralement s'arrêter pour se protéger.

La portion canadienne de l'Atlantique possède l'un des meilleurs potentiels éoliens au monde.

Fond marin — Bathymétrie et sédimentation

Le fond marin de l'Atlantique canadien est passablement profond et accidenté et se prêterait mieux aux plateformes flottantes qu'aux fondations fixes. Le golfe du Saint-Laurent, dont la superficie est de 226 000 km² [186], a une profondeur moyenne de 152 mètres. Seulement 25 % du golfe a une profondeur inférieure à 75 m. La plateforme néo-écossaise, au large de la façade atlantique jusqu'à près de 580 km de la Nouvelle-Écosse [187], est aussi passablement accidenté [188]. Ce plateau est caractérisé par un ensemble de bassins et de crevasses de 160 à 300 mètres de profondeur entourant des bancs de 25 à 100 mètres de profondeur [189]. Le nord de Terre-Neuve et la côte du Labrador sont pour leur part situés à la limite du plateau continental. L'eau a une profondeur inférieure à 200 mètres sur une mince bande de 25 km de largeur en moyenne. Cette bande est néanmoins accidentée et des pentes de 30 degrés sont fréquentes [190]. Quelques larges bancs de moins de 200 m de profondeur sont aussi présents un peu plus au large. L'est de Terre-Neuve, avec son plateau plat à 200 m de profondeur jusqu'à 200 km de la côte, ainsi que le sud de la presqu'île d'Avalon, avec une profondeur de moins de 50 m jusqu'à 10 km de la côte, présentent un meilleur potentiel. La région des Grands Bancs au sud présente aussi des vents et une bathymétrie intéressante, mais elle se trouve à plus de 100 km de la côte [191].

Certaines zones pourraient toutefois convenir à des fondations fixes. Le demi-cercle de près de 69 000 km² [60] longeant la côte entre la péninsule gaspésienne et l'île du Cap-Breton forme un plateau dont la profondeur dépasse rarement 60 mètres. Le banc de l'île de Sable, le plus grand banc du plateau néo-écossais [188], a une profondeur qui pourrait convenir à des monopieux [8].

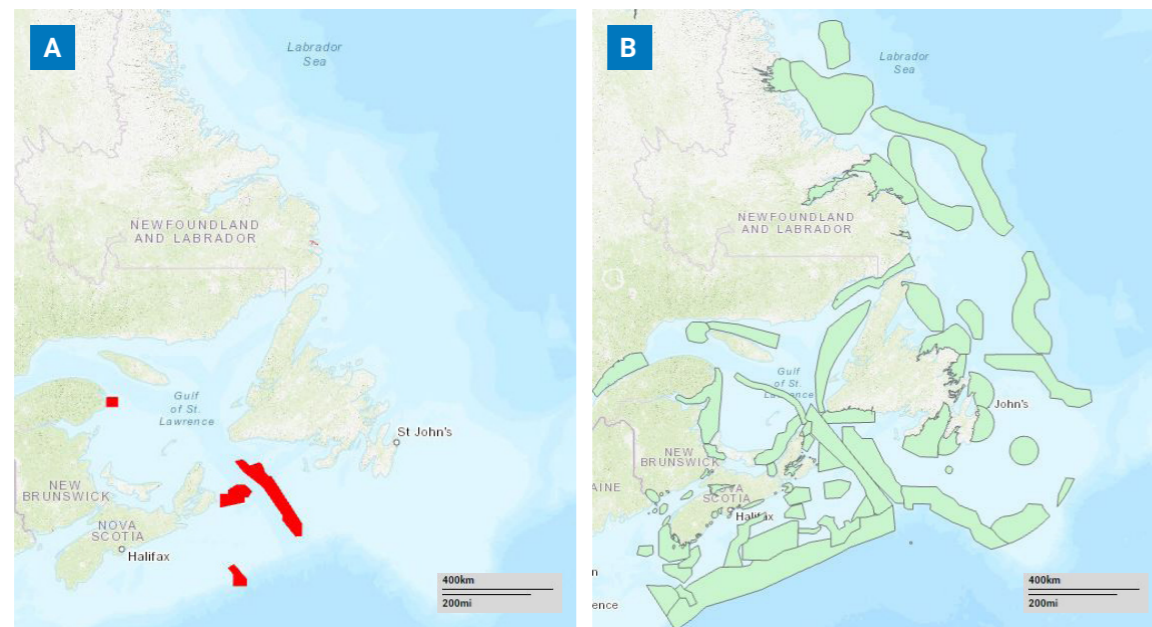
Néanmoins, la sédimentation du fond marin dans l'Atlantique canadien est généralement moins épaisse qu'en mer du Nord ou que sur la côte atlantique des États-Unis. L'identification de zones permettant l'installation de fondations fixes ou offrant un bon ancrage sera donc un plus grand défi [192].

La zone atlantique présente une faible activité sismique. La banque de données de Séisme Canada [193] ne fait état d'aucun séisme d'une magnitude de 6 ou plus et de 37 séismes de magnitude 4 ou 5 depuis 1983 dans un rayon de 700 m autour de l'île du Cap-Breton. Ces séismes sont concentrés dans deux zones, soit à l'entrée de l'estuaire du Saint-Laurent et dans l'océan Atlantique à la naissance du chenal laurentien. Ces zones ne sont pas propices à l'installation d'éoliennes, à cause du trafic maritime et de la distance à la côte respectivement.

Situation écologique

La carte de la Figure 15 montre les endroits dans l'Atlantique qui ont été désignés AMP et ZIEB par le gouvernement du Canada.

Figure 15. Aires marines protégées [194] (A) et zones d'importance écologique et biologique [195] (B) de l'océan Atlantique canadien



Climat froid

En hiver, la température de l'air peut fréquemment être inférieure à 0 degré Celsius. Le passage de nuages humides et les précipitations risqueront de causer l'accumulation de givre sur les pales et les structures, ce qui implique entre autres :

- Des pertes de production;
- Une fatigue mécanique accélérée;
- Un accès aux éoliennes pour maintenance limité.

Une grande partie des eaux de l'Atlantique canadien va aussi se couvrir de glace durant l'hiver [196]. De plus, lors de la fonte, des morceaux de glace ou encore des icebergs (à l'est de Terre-Neuve principalement) risquent de percuter les fondations. Les contraintes statiques et dynamiques supplémentaires causées par cette glace devront être prises en compte lors de la conception des fondations. Les plateformes flottantes pourraient être remorquées temporairement vers un site différent si les glaces menaçaient de les endommager gravement.

Activités humaines

L'installation d'éoliennes ne devrait pas nuire fortement à la circulation maritime. La circulation maritime est dense autour du port de Saint-Jean de Terre-Neuve, dans le sud de la péninsule d'Avalon et à l'entrée du golfe du Saint-Laurent. Dans le golfe comme tel, le trafic est concentré dans le chenal laurentien. La façade atlantique de la Nouvelle-Écosse présente en revanche plusieurs zones de trafic dense à des endroits plus favorables aux éoliennes, dont la partie nord-est du banc de l'île de Sable et les eaux dans la partie sud de la province.

Les provinces de Terre-Neuve et de la Nouvelle-Écosse ont déjà de l'expérience en matière d'exploitation de ressources en mer en vertu de la production de pétrole et de gaz dans le nord-est des Grands Bancs et près de l'île de Sable, respectivement.

La pêche est une activité majeure dans l'Atlantique. En 2020, il y avait plus de 14 000 navires de pêche enregistrés [197]. Des activités de pêche se déroulent sur l'ensemble du territoire. La consultation en amont avec les pêcheurs sera donc primordiale.

La région atlantique compte sur plusieurs ports industriels qui pourraient être aménagés pour accueillir les activités de construction et de transport des éoliennes. Notons entre autres :

- Port de Gaspé, Québec : Des travaux d'agrandissement ont débuté en 2022 afin de pouvoir entreposer et transborder les pales d'éoliennes en mer construite à l'usine de LM Wind Power [198]. Cette usine, la seule à fabriquer des pales au Canada, a fait l'objet d'un agrandissement de plus de 160 M\$ en 2021-2022 afin de pouvoir faire la production de pales d'éoliennes de mer [199].
- Port d'Halifax, Nouvelle-Écosse : Un des plus profonds d'Amérique du Nord (16 m) en plus d'être libre de glace et de subir peu de vagues [200].
- Port de Saint-Jean de Terre-Neuve : Grâce à l'industrie du pétrole et du gaz, le port possède déjà de l'expérience et certaines installations pour desservir des plateformes en mer. L'eau a une profondeur de 10 à 12 m [201].

5.1.2 Dans le Pacifique

À l'ouest, le Canada a une façade de près de 950 km donnant accès à l'océan Pacifique. Un peu moins de 4 millions de personnes vivent près de la côte, dont plus de la moitié dans le Grand Vancouver.

Vents

Tout comme pour l'Atlantique, la côte pacifique possède l'un des meilleurs potentiels éoliens au monde, avec une vitesse moyenne des vents, qui varie entre 8 et 10 m/s, supérieure à celle du golfe du Mexique, de la Méditerranée ou encore de la côte chinoise, par exemple [60].

Le potentiel le plus faible se trouve autour de la partie sud de l'île de Vancouver. Cette zone aurait de toute façon été difficile à exploiter à cause du fort trafic maritime se dirigeant vers les ports de Vancouver ou de Seattle [202], [203].

Le meilleur potentiel se trouve dans la Zone de gestion intégrée de la côte nord du Pacifique (ZGICNP, mieux connue sous son nom anglais *Pacific North Coast Integrated Management Area* [PNCIMA]) [204]. Cette zone de près de 100 000 km² s'étend du nord de l'île de Vancouver jusqu'à la pointe sud de l'Alaska, sur une largeur de 120 à 150 km.

Avec une vitesse moyenne annuelle des vents à 80 m légèrement supérieure à 8 m/s, le potentiel éolien dans la ZGICNP est néanmoins plus faible que du côté atlantique. Cette diminution est particulièrement prononcée durant l'été, quand la vitesse est en moyenne légèrement inférieure à 7 m/s.

Fond marin — Bathymétrie et sédimentation [205]

Le fond marin de la ZGICNP est en quelque sorte une continuation du continent : un relief accidenté comptant plusieurs fjords pouvant atteindre 400 m entrecoupant quelques bancs d'une profondeur variant entre 20 et 200 m. Le plateau continental est toutefois étroit et la profondeur de l'eau est supérieure à 1000 m à environ de 150 km de la côte. Le meilleur potentiel est situé sur les deux bancs suivants [206] :

Goose Island Bank

- Situé en face de Bella Bella, et à une centaine de kilomètres au nord de l'île de Vancouver
- Profondeur de l'eau variant de quelques dizaines de mètres à 100 m
- Aucune ZIEB
- Le milieu se prête à l'installation d'éoliennes en mer fixes et flottantes

Dogfish Bank

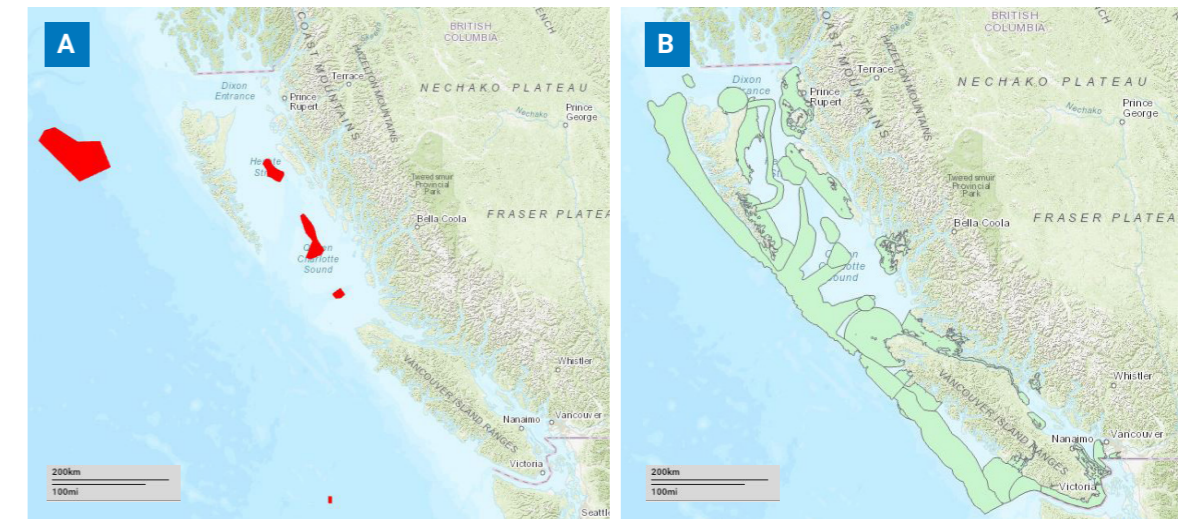
- Large zone entre le continent et l'archipel Haida Gwaii en face de Prince Rupert
- Certaines parties sont désignées ZIEB
- La profondeur de l'eau varie entre 20 et 40 m
- Épaisseur de sédiments d'au moins 40 m
- Propice aux éoliennes sur fondations fixes
- Northland Power y détient des droits pour un parc de 400 MW [207].

La fin du plateau continental, qui est situé à moins de 50 km de ces bancs, est cependant une zone sismique intense. La banque de données de Séisme Canada [193] fait état de 732 séismes de magnitude 4 ou plus dans la ZGICNP depuis 1983, dont 19 de magnitude 6 et plus.

Situation écologique

La carte de la Figure 16 montre les endroits dans le Pacifique qui ont été désignés AMP et ZIEB par le gouvernement du Canada.

Figure 16. Aires marines protégées [194] (A) et zones d'importance écologique et biologique [195] (B) de l'océan Pacifique canadien



Climat froid

Les températures sur la côte Ouest en hiver sont plus chaudes qu'à l'est. La température de l'air y descend néanmoins parfois sous 0 degré Celsius et des précipitations givrantes sont possibles [208]. Toutefois, la surface de l'eau ne se couvre pas de glace [196].

Activités humaines

L'installation d'éoliennes ne devrait pas nuire fortement à la circulation maritime. La densité du trafic maritime en 2020-2021 est très forte autour de l'île de Vancouver ainsi qu'au nord d'Haida Gwaii pour l'entrée du port de Prince Rupert. Dans la ZGICNP, le trafic se concentre dans un seul corridor, laissant le reste de la zone avec un trafic très faible [202].

L'industrie de la pêche est présente dans le Pacifique, mais elle est moins importante que dans l'Atlantique. Un peu plus de 2000 bateaux de pêche sont enregistrés [197]. En valeur de débarquement, l'espèce la plus pêchée est le saumon du Pacifique [209]. La quantité de saumon décline cependant. Le gouvernement du Canada a donc mis en place un programme de rachat des permis de pêche en 2022 [210]. Cela devrait diminuer les risques de conflits d'usage. Toutefois, cela crée beaucoup d'incertitude et de stress chez les pêcheurs [211], qui pourraient donc être moins réceptifs si les éoliennes imposent des contraintes additionnelles à la pêche.

Il existe deux grands ports sur la côte Ouest :

- Port de Vancouver : port le plus grand et le plus utilisé du Canada. Situé près du cœur industriel de la Colombie-Britannique. Il offre une profondeur d'eau de plus de 14 m [212];
- Port de Prince Rupert : situé au nord de la ZGICNP. Bien qu'il soit au nord, il reste libre de glace toute l'année. Il offre une profondeur d'eau de plus de 35 m [213].

5.1.3 Dans les Grands Lacs

Plus de 30 % de la population du Canada, soit plus de 11 millions de personnes, vit autour des Grands Lacs [214]. À lui seul, le Grand Toronto, situé sur la côte du lac Ontario, compte plus de 6,5 millions de personnes [215].

Vents

Grâce à leur très grande superficie (244 000 km², dont 87 500 km² [35 %] au Canada), la vitesse moyenne des vents à 80 m au-dessus des Grands Lacs atteint les 7 m/s près des rives et dépasse les 8 m/s au centre, et se maintient au-dessus de 6 m/s en été. Ces conditions, autant en vent qu'en superficie, sont similaires à celles observées dans le Pacifique. La densité de puissance est cependant légèrement plus faible. Le NREL estime néanmoins le potentiel éolien technique dans la partie américaine des Grands Lacs à 575 GW. Au prorata de la superficie, ceci pourrait représenter un potentiel de 288 GW au Canada. Ce potentiel a le grand avantage d'être situé à proximité des lieux d'habitation de la quasi-totalité des Ontariens. Pour référence, la capacité de production électrique de l'Ontario en 2020 était de 38 GW [216].

Fond marin – Bathymétrie et sédimentation

Avec une profondeur moyenne et maximale de 19 m et de 64 m respectivement, le lac Érié se prête bien à l'installation d'éoliennes en mer sur fondations fixes. L'éolienne flottante serait mieux adaptée aux quatre autres lacs puisque leur profondeur moyenne varie entre 59 et 86 mètres, et atteint même 147 m dans le lac Supérieur [217].

Le transport d'équipement entre le lac Ontario et les autres lacs sera toutefois complexe puisqu'il faudra passer par les huit écluses du canal de Welland. Le passage entre le lac Supérieur et le lac Huron nécessite de passer dans les deux écluses de Sault. Ces écluses peuvent accueillir des bateaux dont la taille ne doit pas dépasser 225,5 m de long et 23,8 m de large [218]. Des installations portuaires dédiées pourraient être nécessaires dans chacun des Grands Lacs.

La région présente une activité sismique négligeable. De plus, les Grands Lacs ne comptent aucune ZIEB.

Situation écologique

Aucune partie des Grands Lacs n'est désignée AMP ou ZIEB.

Climat froid

La température de l'air au-dessus des Grands Lacs descend régulièrement sous 0 degré Celsius en hiver. De plus, une grande partie des lacs se couvrent de glace. Le couvert de glace varie cependant de lac en lac [219]. Les protections contre le climat froid sont donc requises.

.....

À cause des nombreuses écluses reliant les Grands Lacs, des installations portuaires dédiées pourraient être nécessaires dans chacun d'eux.

.....

Activités humaines

L'installation d'éoliennes ne devrait pas nuire fortement à la circulation maritime. Même durant la saison haute, la densité de circulation maritime dans la partie canadienne des Grands Lacs (à l'extérieur de la voie maritime) est relativement faible, particulièrement dans les lacs Supérieurs et Huron [202], [220]. Des risques de conflits d'usage pourraient être plus importants dans le lac Ontario.

L'industrie de la pêche, autant commerciale que récréative, est bien présente dans les Grands Lacs. Entre 25 000 et 30 000 tonnes de poissons sont pêchées chaque année par l'industrie commerciale, dont 80 % dans le lac Érié [221]. En incluant l'industrie de la transformation, ces entreprises produisaient un revenu de près de 140 millions de dollars en 2013 [222].

Il existe plusieurs ports sur les Grands Lacs. Le port de Hamilton, sur le lac Ontario, est le plus grand port canadien des Grands Lacs [223]. Il est aussi situé dans une région produisant une grande quantité d'acier et pourrait donc former une synergie avec l'industrie éolienne. L'eau dans le havre a une profondeur de 8 m [224].

5.2 Les acteurs de l'industrie éolienne extracôtière

Grâce aux nombreux projets d'éolien terrestre et à ceux liés au pétrole et au gaz en mer réalisés au cours des dernières décennies, le Canada compte déjà sur une industrie, des associations et une main-d'œuvre expérimentées capables de relever les défis inhérents à l'éolien extracôtier.

Il y a plusieurs acteurs clés dans l'industrie éolienne canadienne, notamment les sociétés d'énergie, les entreprises de construction et les fournisseurs de technologies :

- **Les opérateurs de parcs éoliens tels que EDF Renewables et Innergex qui sont engagés dans la mise en place de projets éoliens au Québec;**
- **Les entreprises de construction telles que SNC-Lavalin et Alstom, qui ont une grande expérience dans la construction d'infrastructures énergétiques;**
- **Les fournisseurs de technologies, tels que GE Renewable Energy et Siemens Gamesa, sont également des acteurs clés de l'industrie éolienne québécoise, puisqu'ils fournissent des éoliennes et des technologies de pointe;**
- **Les entreprises de service et de maintenance éolienne qui sont chargées de l'entretien et de la réparation des éoliennes en mer;**
- **Les entreprises de consultation et d'ingénierie qui fournissent des services de planification, de conception et de gestion de projet pour les projets éoliens en mer;**
- **Les entreprises de fabrication de composants éoliens comme les pales, les générateurs, les boîtiers de commande, etc.;**
- **Les entreprises de transport maritime et logistique qui sont impliquées dans l'acheminement et le transport des équipements et des matériaux nécessaires à la construction des parcs éoliens en mer.**

L'industrie maritime canadienne participe au développement de l'éolien extracôtier de plusieurs manières. Tout d'abord, les entreprises de transport maritime et de logistique sont impliquées dans l'acheminement et le transport des équipements et des matériaux nécessaires à la construction des parcs éoliens extracôtiers. Les chantiers navals et les fabricants de composants éoliens ont également un rôle à jouer dans la production de navires pour les opérations liées à l'éolien extracôtier, comme les navires de service et les navires de transport de charges lourdes. De plus, les ports et les terminaux peuvent être utilisés pour le stockage et la distribution des équipements nécessaires à la construction et à l'exploitation des parcs éoliens extracôtiers.

Le tableau à l'annexe B présente une liste non exhaustive des différentes entreprises au Canada qui sont actives dans les secteurs en lien avec l'éolien extracôtier.

En résumé, le Québec et le Canada possèdent une combinaison de compétences éprouvées et d'acteurs clés qui œuvrent dans différents secteurs en rapport avec l'éolien extracôtier au Canada.

.....

Grâce aux nombreux projets d'éolien terrestre et à ceux liés au pétrole et au gaz en mer réalisés au cours des dernières décennies, le Canada compte déjà sur une industrie, des associations et une main-d'œuvre expérimentées capables de relever les défis inhérents à l'éolien extracôtier.

.....



6. Conclusion, perspectives et recommandations

Ce mémoire a pour objectif d'évaluer la pertinence de l'éolien extracôtier en tant que source potentielle d'approvisionnement énergétique pour le Canada dans le cadre de son engagement en faveur de la carboneutralité à l'horizon 2050. En effet, la mobilisation d'une plus grande capacité d'énergie renouvelable, notamment l'éolien et le solaire photovoltaïque, est essentielle pour atteindre ces objectifs. Bien que l'énergie éolienne extracôtère ne soit pas encore exploitée au Canada, nous avons constaté qu'il existe une filière éolienne solide, qui a développé un savoir-faire important permettant le développement de projets éoliens extracôtiers à fort potentiel.

Ainsi, nous avons démontré dans ce mémoire que les progrès technologiques liés à la conception, à l'installation et à l'exploitation des parcs éoliens extracôtiers au Canada ont atteint un niveau de développement avancé. Le pays bénéficie de l'expérience acquise dans le domaine de l'éolien terrestre, ainsi que de celle des parcs éoliens extracôtiers en opération dans d'autres régions du monde. De plus, la technologie pour les parcs éoliens extracôtiers en climat froid est disponible, comme en témoigne le parc éolien de Tahkoluoto en Finlande, conçu pour des conditions glaciales. Cette expertise pourrait être mise à profit pour le développement de l'éolien extracôtier au Canada, qui doit faire face à des conditions climatiques similaires.



L'éolien extracôtier : un atout pour la décarbonation de l'économie au Canada

Comme nous l'avons mis en évidence dans les précédentes sections du mémoire, le développement de l'éolien extracôtier présente un avantage indéniable et contribuera à l'atteinte des objectifs de décarbonation, tant à l'échelle mondiale qu'au Canada. Par ailleurs, tandis que le taux des ajouts de capacité d'énergie éolienne terrestre devrait rester stable dans les années à venir, le recours à l'éolien extracôtier est, quant à lui, destiné à s'accroître davantage dans les marchés existants tels que l'Union européenne et la Chine, tandis que ces systèmes feront leur entrée dans de nouveaux pays comme les États-Unis, Taiwan et le Japon.

En comparaison de l'éolien terrestre, l'éolien extracôtier offre de nombreux atouts pour le Québec et le Canada. En effet, le gisement éolien en mer du Canada est extrêmement prometteur et pourrait permettre de développer une importante capacité de production électrique. Les régions côtières du Canada sont particulièrement bien situées pour exploiter les ressources en énergie éolienne, avec des sites stratégiques que l'on trouve le long des côtes des océans Atlantique et Pacifique, ainsi que le long des rives des Grands Lacs. Ces régions disposent de vents plus forts et constants qui soufflent toute l'année et offrent une vaste profondeur d'eau, ce qui permet l'installation de turbines plus grandes.

De plus, l'éolien extracôtier offre une plus grande stabilité au réseau énergétique, ce qui le rend plus fiable et moins vulnérable aux fluctuations de la production. Les turbines de grande capacité utilisées en mer permettent également de produire davantage d'électricité que les éoliennes terrestres.

En outre, les parcs éoliens extracôtiers ne sont pas soumis aux enjeux des parcs terrestres, ce qui minimise les conflits d'usage des terres, notamment agricoles ou forestières. Enfin, l'éolien extracôtier pourrait constituer une option pour surmonter la résistance d'une partie de la population à l'installation d'éoliennes terrestres. Tous ces avantages soulignent l'importance de développer l'éolien extracôtier pour le Québec et le Canada dans la perspective de la carboneutralité.

L'éolien extracôtier : des enjeux à prendre en compte

Il ne faut cependant pas sous-estimer les inconvénients éventuels de l'éolien extracôtier, particulièrement les répercussions sur la faune et la flore marines, la pêche et d'autres activités humaines. Ces impacts potentiels ont été passés en revue dans ce mémoire et doivent impérativement être pris en compte dans tout nouveau projet. Il existe un besoin de renforcer la collaboration entre les différents acteurs impliqués dans la mise en place de projets éoliens extracôtiers, par exemple les gouvernements, les développeurs, les communautés locales et les parties prenantes, en adoptant une approche inclusive et transparente. Cette collaboration peut contribuer à la création d'un environnement propice au développement de projets éoliens extracôtiers et à l'atteinte des objectifs de carboneutralité.

Il est également important de souligner que le coût de l'électricité produite en mer ne devrait pas être considéré comme un frein au déploiement des parcs éoliens extracôtiers, car il est compensé par les avantages économiques et énergétiques dont bénéficiera le Canada à long terme. En outre, les tendances du marché mondial montrent une baisse des coûts de la technologie éolienne extracôtère qui devrait se poursuivre à mesure que la technologie évoluera et que l'industrie se développera.

Enfin, comme il n'existe pas encore de parc éolien extracôtier en opération au Canada, la législation existante n'a pas vraiment pu être testée « grandeur nature », et il y aura peut-être une période de rodage avant qu'elle soit complètement opérante. Il conviendrait donc de focaliser les efforts sur la clarification des procédures d'autorisation, l'assistance dans l'identification de sites adéquats, la diminution des coûts et la réduction des délais de développement des projets.

L'éolien extracôtier au Canada : recommandations

1) Définir clairement les exigences réglementaires pour les projets éoliens extracôtiers

L'éolien extracôtier est une source d'énergie renouvelable prometteuse pour le Canada, mais pour en tirer parti efficacement, il est essentiel d'adopter un cadre réglementaire clair et accessible afin de :

- Fournir aux développeurs toutes les informations dont ils ont besoin pour comprendre les processus d'approbation, d'obtention de permis et de suivi nécessaires pour mettre en œuvre un projet éolien extracôtier;
- Établir un processus d'implication communautaire transparent et inclusif qui permettra aux communautés locales de participer activement aux processus décisionnels;
- Harmoniser les réglementations provinciales et fédérales : des efforts doivent être déployés pour établir une collaboration entre les gouvernements de manière à mettre en place des réglementations cohérentes pour les projets éoliens extracôtiers;
- Adopter des protocoles fédéraux et provinciaux sur le partage des responsabilités et des compétences, notamment en ce qui concerne les évaluations environnementales et les revenus tirés de l'exploitation des éoliennes extracôtères;
- Mettre en place des exigences de conformité environnementale rigoureuses.

2) Favoriser une collaboration active avec les partenaires internationaux de l'industrie éolienne extracôtère

Cette approche permettra de favoriser l'innovation et d'accélérer l'adoption des technologies émergentes, tout en stimulant la croissance économique du secteur de l'éolien extracôtier.

- Favoriser les partenariats internationaux pour le développement de projets éoliens extracôtiers, en particulier avec les pays ayant déjà en place des projets dans ce domaine.
- Soutenir les organismes et associations œuvrant dans le secteur extracôtier pour élargir les opportunités de marché à l'échelle nationale et internationale.
- Promouvoir la collaboration et la coordination entre les différents gouvernements pour harmoniser les politiques et réglementations relatives à l'énergie éolienne extracôtère.
- Soutenir la recherche et le développement de technologies éoliennes extracôtères innovantes et concurrentielles sur le marché mondial en collaboration avec des partenaires internationaux.

3) Encourager et soutenir les projets de développement éolien extracôtier au Canada

La collaboration entre les différents acteurs de la filière est également essentielle pour assurer la viabilité de l'industrie éolienne extracôtière au Canada. À cet effet, il est recommandé de :

- Mettre en place des appels à projets pour identifier les acteurs clés et favoriser leur collaboration;
- Créer des incitatifs pour les investisseurs et les développeurs de projets éoliens extracôtiers;
- Collaborer avec l'industrie pour mettre en place des projets de démonstration de l'énergie éolienne extracôtière, en travaillant avec les développeurs de projets pour identifier les sites potentiels et les technologies appropriées;
- Faciliter la collecte et l'accès aux données;
- Promouvoir la formation d'une main-d'œuvre spécialisée pour soutenir la croissance de l'industrie éolienne extracôtière;
- Fournir un soutien proactif à l'écosystème canadien déjà en place pour enclencher le développement de projets éoliens extracôtiers au Canada.

4) Soutenir la recherche et développement

Enfin, pour favoriser l'émergence d'une expertise de l'extracôtier, il est recommandé de :

- Mettre en place des programmes de subvention pour soutenir la recherche et le développement dans le domaine. Ces programmes devraient être axés sur des enjeux spécifiques liés aux conditions uniques au Canada, comme les défis associés au climat froid;
- Encourager la collaboration entre les universités, les collèges, les centres de recherche et l'industrie pour stimuler l'innovation;
- Investir dans des programmes de formation spécialisés pour répondre aux besoins de l'industrie et assurer la relève.

En résumé, le développement de projets éoliens extracôtiers au Canada doit prendre en compte une multitude de facteurs, notamment les cadres réglementaires, les subventions et les incitations financières, les processus d'autorisation environnementale et de planification spatiale, l'implication des parties prenantes, les études sur les impacts environnementaux et la collaboration internationale.

L'éolien extracôtier au Canada : perspectives

Le Canada est en mesure de se positionner comme un acteur clé dans l'essor de l'énergie éolienne extracôtière. Cette filière est en pleine expansion dans le monde et représente une opportunité économique importante pour les pays qui souhaitent s'engager dans cette voie. En montant dans ce train en marche, le Canada peut bénéficier de retombées économiques pour les communautés côtières et d'une croissance de son secteur des énergies renouvelables tout en contribuant à l'atteinte des objectifs de carboneutralité. Le Québec et le Canada ont déjà acquis une solide expérience dans l'industrie éolienne terrestre, ce qui leur permet d'avoir un avantage concurrentiel dans le développement de l'industrie éolienne extracôtière. Le savoir-faire et l'expertise canadiens et québécois peuvent être exportés vers d'autres pays, ce qui pourra renforcer la position du pays sur la scène internationale en matière d'énergie renouvelable.

En conclusion, le Canada dispose d'un potentiel remarquable en matière d'énergie éolienne extracôtière, qu'il serait regrettable de ne pas exploiter. Les avantages envisagés en matière de développement économique et énergétique sont considérables et devraient aider le pays à renforcer sa position de leader dans le développement durable. Bien que le Canada soit légèrement en retard par rapport à d'autres pays dans ce domaine, il peut capitaliser sur les enseignements tirés des expériences et des projets menés ailleurs dans le monde. La technologie nécessaire est désormais prête et opérationnelle, il est maintenant impératif que les différents échelons fédéraux, provinciaux et locaux fassent preuve d'une volonté politique cohérente pour permettre au Canada de valoriser pleinement ses gisements d'énergie éolienne extracôtière.



Références

- [1] IEA, « Energy Technology Perspectives 2023 », IEA - International Energy Agency, Paris, 2023. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/a86b480e-2b03-4e25-bae1-da1395e0b620/EnergyTechnologyPerspectives2023.pdf> (consulté le 13 février 2023).
- [2] G. Brinkman *et al.*, « The North American Renewable Integration Study: A Canadian Perspective », National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, NREL/TP-6A20-79225, juin 2021. <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/79225.pdf> (consulté le 13 février 2023).
- [3] M. Cucchi, « Un parc éolien marin inédit au Canada bientôt dans les eaux de Haida Gwaii? », *Radio-Canada*, 28 août 2019. <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1276016/parc-eolien-eaux-haida-gwaii> (consulté le 3 janvier 2023).
- [4] Government of Nova Scotia, « Province Sets Offshore Wind Target », 20 septembre 2022. <https://novascotia.ca/news/release/?id=20220920003> (consulté le 3 janvier 2023).
- [5] Gouvernement du Canada, « Évaluation régionale de l'exploitation de l'énergie éolienne extracôtière en Nouvelle-Écosse », 23 mars 2023. <https://iaac-aeic.gc.ca/050/evaluations/proj/83514?culture=fr-CA> (consulté le 4 mai 2023).
- [6] Gouvernement du Canada, « Évaluation régionale de l'exploitation de l'énergie éolienne extracôtière à Terre-Neuve-et-Labrador », 23 mars 2023. <https://iaac-aeic.gc.ca/050/evaluations/proj/84343?culture=fr-CA> (consulté le 4 mai 2023).
- [7] R. Blue et B. Jeyakumar, « Offshore wind in Canada - Potential sites, cost and emissions reduction impact », Pembina Institute, mai 2022. <https://www.pembina.org/pub/offshore-wind-canada> (consulté le 3 janvier 2023).
- [8] G. Tang et R. Kilpatrick, « Offshore Wind Technology Scan - A review of offshore wind technologies and considerations in the context of Atlantic Canada », Natural Resources Canada, CANMET, Ottawa (Ontario), M154-147/2021E-PDF, déc. 2021. https://publications.gc.ca/collections/collection_2022/rncan-nrcan/M154-147-2021-eng.pdf (consulté le 10 novembre 2022).
- [9] U.S. Department of Energy, « Offshore Wind Market Report:2022 Edition », U.S. Department of Energy, DOE/GO-102022-5765, août 2022. <https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-09/offshore-wind-market-report-2022-v2.pdf> (consulté le 2 novembre 2022).
- [10] S. Horwath, J. Hassrick, R. Grismala, et E. Diller, « Comparison of Environmental Effects from Different Offshore Wind Turbine Foundations », U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Ocean Energy Management, Sterling (VA), OCS Study BOEM 2020-041, 2020. <https://www.boem.gov/sites/default/files/documents/environment/Wind-Turbine-Foundations-White%20Paper-Final-White-Paper.pdf>
- [11] Windpower Engineering & development, « Comparing offshore wind turbine foundations », 4 janvier 2021. <https://www.windpowerengineering.com/comparing-offshore-wind-turbine-foundations/> (consulté le 15 août 2022).
- [12] GDF Suez, edp renewables, et neoen marine, « Fiche Thématique D - Les différents types de fondations existants ». Éoliennes en mer Îles d'Yeu et de Noirmoutier. https://cpdp.debatpublic.fr/cdpd-eolienmer-pyn/sites/debat.eolienmer_pyn/files/les_types_de_fondations_existants_0.pdf (consulté le 16 août 2022).
- [13] Iberdrola, « Do you know how offshore wind farms work? », *WHAT IS OFFSHORE WIND ENERGY*, 2022. <https://www.iberdrola.com/sustainability/how-does-offshore-wind-energy-work> (consulté le 16 août 2022).
- [14] T. Stehly et P. Duffy, « 2020 Cost of Wind Energy Review », NREL, Golden, CO, NREL/TP-5000-81209, janv. 2022. <https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/81209.pdf>
- [15] Tethys, « Fixed Offshore Wind ». <https://tethys.pnnl.gov/technology/fixed-offshore-wind> (consulté le 17 novembre 2022).
- [16] D. Cathie *et al.*, « Suction Installed Caisson Foundations for Offshore Wind: Design Guidelines », the Carbon Trust on behalf of the Offshore Wind Accelerator programme, févr. 2019. <https://ctprodstorageaccountp.blob.core.windows.net/prod-drupal-files/documents/resource/public/owa-suction-caisson-design-guidelines-report.pdf>
- [17] K. Davis, « How Deep can the Monopile go in Offshore Wind? », 10 mai 2019. <https://www.empireengineering.co.uk/how-deep-can-the-monopile-go-in-offshore-wind/> (consulté le 18 novembre 2022).
- [18] S. Koschinski et K. Lüdemann, « Noise mitigation for the construction of increasingly large offshore wind turbines: Technical options for complying with noise limits », Federal Agency for Nature Conservation (Bundesamt für Naturschutz, BfN), Allemagne, mars 2020. <https://www.bfn.de/sites/default/files/BfN/meeresundkuestenschutz/Dokumente/noise-mitigation-for-the-construction-of-increasingly-large-offshore-wind-turbines.pdf>
- [19] V. Negro, J.-S. López-Gutiérrez, M. D. Esteban, P. Alberdi, M. Imaz, et J.-M. Serracarla, « Monopiles in offshore wind: Preliminary estimate of main dimensions », *Ocean Eng.*, vol. 133, p. 253-261, mars 2017, doi: 10.1016/j.oceaneng.2017.02.011.
- [20] Boslan, « The next generation monopile foundations for offshore wind turbines ». <https://www.boslan.com/offshore-wind-farms/monopile-foundations/> (consulté le 17 novembre 2022).
- [21] Boskalis, « OFFSHORE WIND FARM MONOPILE INSTALLATION, VEJA MATE ». <https://boskalis.com/about-us/projects/offshore-wind-farm-monopile-installation-veja-mate> (consulté le 18 novembre 2022).
- [22] Danish Wind Industry Association, « Fondations offshore nouvelles : le trépied », 10 mai 2003. <http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/fr/tour/rd/tripod.htm> (consulté le 15 décembre 2022).
- [23] Global Wind Energy Council, « Floating Offshore Wind – a Global Opportunity », GWEC, 2022. <https://gwec.net/report-outlines-enormous-potential-for-floating-offshore-wind-in-energy-transition/#:~:text=The%20market%20is%20nascent%2C%20but,that%20of%20fixed%2Dbottom%20turbines.>
- [24] R. Chitteth Ramachandran, C. Desmond, F. Judge, J.-J. Serraris, et J. Murphy, « Floating offshore wind turbines: Installation, operation, maintenance and decommissioning challenges and opportunities », Operation, condition monitoring, and maintenance, preprint, oct. 2021. doi: 10.5194/wes-2021-120.
- [25] M. Sobhania, F. Petrini, M. Karimirad, et F. Bontempi, « Fatigue Life Assessment for Power Cables in Floating Offshore Wind Turbines », *Energies*, vol. 13, n° 12, p. 3096, juin 2020, doi: 10.3390/en13123096.

- [26] Floatgen, « Wind Power Going Further Offshore ». <https://floatgen.eu/> (consulté le 27 novembre 2022).
- [27] Shell Global, « TETRASPAR demonstrator, the world's first fully industrialized floating offshore foundation, is now commissioned and in operation », 2 décembre 2021. <https://www.shell.com/energy-and-innovation/new-energies/new-energies-media-releases/tetraspar-demonstrator-is-now-commissioned-and-in-operation.html> (consulté le 27 novembre 2022).
- [28] equinor, « Hywind Scotland ». <https://www.equinor.com/energy/hywind-scotland> (consulté le 27 novembre 2022).
- [29] edp renewables, « WindFloat Atlantic ». <https://www.edp.com/en/innovation/windfloat> (consulté le 3 janvier 2023).
- [30] Principle Power, « Kinkardine Offshore Wind Farm ». <https://www.principlepower.com/projects/kinkardine-offshore-wind-farm> (consulté le 20 décembre 2022).
- [31] T. Stehly, P. Beiter, et P. Duffy, « 2019 Cost of Wind Energy Review », National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO, 2020.
- [32] Korea Floating Wind, « Project Overview ». <https://koreafloatingwind.kr/en-project-overview> (consulté le 3 janvier 2023).
- [33] BWO (Association fédérale des exploitants de parcs éoliens offshore), « Expansion en haute mer grâce à l'énergie éolienne flottante ». <https://bwo-offshorewind.de/fr/category/offshore-windenergie/weiteres/floating/> (consulté le 3 décembre 2022).
- [34] InfoLink Consulting, « Floating wind turbine II: Floating structure technology and market trends », 17 décembre 2021. <https://www.infolink-group.com/energy-article/Floating-wind-turbine-II-Floating-structure-technology-and-market-trends> (consulté le 3 décembre 2022).
- [35] A. Du, « Semi-Submersible, Spar and TLP – How to select floating wind foundation types? », *Empire Engineering*, 27 août 2021. <https://www.empireengineering.co.uk/semi-submersible-spar-and-tlp-floating-wind-foundations/> (consulté le 22 décembre 2022).
- [36] Iberdrola, « Floating offshore wind power: a milestone to boost renewables through innovation ». <https://www.iberdrola.com/innovation/floating-offshore-wind> (consulté le 20 août 2022).
- [37] NREL, « NREL Floats New Offshore Wind Cost Optimization Vision », 7 août 2020. <https://www.nrel.gov/news/program/2020/nrel-floats-new-offshore-wind-cost-optimization-tool.html> (consulté le 5 décembre 2022).
- [38] A. Durakovic, « Offshore Construction Starts on Japan's First Floating Wind Farm », *OffshoreWIND.biz*, 18 octobre 2022. <https://www.offshorewind.biz/2022/10/18/offshore-construction-starts-on-japans-first-floating-wind-farm/> (consulté le 3 décembre 2022).
- [39] Principle Power, « Projects ». <https://www.principlepower.com/projects> (consulté le 3 décembre 2022).
- [40] Towards a Modular Future, « HiveWind ». <https://hivewindenergy.com/> (consulté le 22 décembre 2022).
- [41] Provence Grand Large, « Le projet, en résumé ». <https://provencegrandlarge.fr/le-projet/linnovation-provence-grand-large/> (consulté le 3 décembre 2022).
- [42] Floating Wind Turbines, « Technology ». <http://floatingwindfarm.weebly.com/technology.html> (consulté le 20 août 2022).
- [43] ABC Moorings, « Mooring systems ». <http://abc-moorings.weebly.com/mooring-systems.html> (consulté le 20 août 2022).
- [44] Environnement et Changement climatique Canada, « Carte globale - Atlas éolien du Canada », Gouvernement du Canada, 21 juin 2016. <http://www.windatlas.ca/maps-en.php?field=E1&height=50&season=ANU> (consulté le 19 décembre 2022).
- [45] Wind Energy - The Facts, « Measurement Offshore », *European Commission*. <https://www.wind-energy-the-facts.org/measurement-offshore.html> (consulté le 21 décembre 2022).
- [46] Windpower Monthly, « Do we still need met masts? » <https://www.windpowermonthly.com/article/1458018/need-met-masts> (consulté le 21 décembre 2022).
- [47] National Geographic, « Continental shelf ». <https://education.nationalgeographic.org/resource/continental-shelf> (consulté le 23 août 2022).
- [48] Division for Ocean Affairs and the Law of the Sea, Office of Legal Affairs, United Nations, *Commission on the Limits of the Continental Shelf (CLCS) - The continental shelf*. https://www.un.org/depts/los/clcs_new/continental_shelf_description.htm (consulté le 20 décembre 2022).
- [49] NOAA National Centers for Environmental Information, « ETOPO 2022 15 Arc-Second Global Relief Model », NOAA, 2022. <https://www.ncei.noaa.gov/products/etopo-global-relief-model> (consulté le 20 décembre 2022).
- [50] International Renewable Energy Agency (IRENA) et UEA, « Future of wind - deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects », Abu Dhabi, 2019. <https://www.irena.org/publications/2019/Oct/Future-of-wind>
- [51] *Windfarm site assessment: Modelling hazards and costs*, (19 juin 2020). <https://www.youtube.com/watch?v=Jvvoq3ue-UQ> (consulté le 3 janvier 2023).
- [52] A. R. Dehghani-Sanij, S. R. Dehghani, G. F. Naterer, et Y. S. Muzychka, « Sea spray icing phenomena on marine vessels and offshore structures: Review and formulation », *Ocean Eng.*, vol. 132, p. 25-39, mars 2017, doi: 10.1016/j.oceaneng.2017.01.016.
- [53] W. Popko, A. Reuter, et M. Muskulus, « Impact of sea ice loads on global dynamics of offshore wind turbines », Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2021. https://www.researchgate.net/publication/348297303_Impact_of_Sea_Ice_Loads_on_Global_Dynamics_of_Offshore_Wind_Turbines
- [54] The Maritime Executive, « Finland's First Offshore Wind Farm Suited to Ice », 3 octobre 2017. <https://www.maritime-executive.com/article/finlands-first-offshore-wind-farm-suited-to-ice> (consulté le 21 décembre 2022).
- [55] IRENA, « Renewable Power Generation Costs in 2020 », International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2021.
- [56] R. Wiser *et al.*, « Expert elicitation survey predicts 37% to 49% declines in wind energy costs by 2050 », *Nat. Energy*, vol. 6, n° 5, p. 555-565, mai 2021, doi: 10.1038/s41560-021-00810-z.

- [57] T. Burton, N. Jenkins, D. Sharpe, et E. Bossanyi, « Offshore wind turbines and wind farms », dans *Wind Energy Handbook*, John Riley & Sons, Éd., 2011, p. 613-728. doi: 10.1016/b978-0-08-102264-1.00011-x.
- [58] J. McCloy, « Onshore vs Offshore Wind: What Are the Differences and Facts? », *Green coast*, 17 septembre 2019. <https://greencoast.org/onshore-vs-offshore-wind/#:~:text=Onshore%20wind%20is%20the%20one,in%20pressure%2C%20in%20the%20atmosphere.> (consulté le 15 août 2022).
- [59] National Grid, « Onshore vs offshore wind energy: what's the difference? » <https://www.nationalgrid.com/stories/energy-explained/onshore-vs-offshore-wind-energy> (consulté le 15 août 2022).
- [60] Technical University of Denmark (DTU), « Global Wind Atlas », *GWA App*. <https://globalwindatlas.info/> (consulté le 3 novembre 2022).
- [61] Organisation des Nations Unies, « Factsheet: People and Oceans », présenté à The Ocean Conference, ONU, New-York, juin 2017, p. 7. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/wp-content/uploads/2017/05/Ocean-fact-sheet-package.pdf> (consulté le 15 août 2022).
- [62] WindEurope, « Wind energy is the cheapest source of electricity generation », 29 mars 2019. <https://windeurope.org/policy/topics/economics/#:~:text=Offshore%20wind%20is%20on%20a,2025%20depending%20on%20projects%20pipeline.> (consulté le 4 janvier 2023).
- [63] S. Ganter *et al.*, « Océans du Canada et contribution économique des secteurs maritimes ». Statistique Canada, 19 juillet 2021. <https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/16-002-x/2021001/article/00001-fra.htm> (consulté le 22 décembre 2022).
- [64] A. Arneith *et al.*, « Post-2020 biodiversity targets need to embrace climate change », *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 117, n° 49, p. 30882-30891, déc. 2020, doi: 10.1073/pnas.2009584117.
- [65] Convention on Biological Diversity, « Decision 15/4. Kunming-Montreal Global Biodiversity Framework », présenté à Conference of the Parties to the Convention on Biological Diversity - Fifteenth meeting (COP15), Montréal, Canada (7-19 December 2022), déc. 2022. <https://www.cbd.int/doc/decisions/cop-15/cop-15-dec-04-en.pdf> (consulté le 13 mars 2023).
- [66] Copping, A. *et al.*, « Annex IV 2016 State of the Science Report: Environmental Effects of Marine Renewable Energy Development Around the World », U.S. Department of Energy, 2016. https://tethys.pnnl.gov/sites/default/files/publications/Annex-IV-2016-State-of-the-Science-Report_MR.pdf
- [67] A. E. Copping, M. C. Freeman, A. M. Gorton, et L. G. Hemery, « Risk Retirement—Decreasing Uncertainty and Informing Consenting Processes for Marine Renewable Energy Development », *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 8, n° 3, p. 172, mars 2020, doi: 10.3390/jmse8030172.
- [68] The Crown Estate, « 2.8 GW of offshore wind extension projects to progress, following completion of plan level Habitats Regulations Assessment », 28 août 2019. <https://www.thecrownestate.co.uk/en-gb/media-and-insights/news/2019-28-gw-of-offshore-wind-extension-projects-to-progress-following-completion-of-plan-level-habitats-regulations-assessment/> (consulté le 4 janvier 2023).
- [69] B. Berwyn, « How do wind farms affect ocean ecosystems? », *DW*, 22 novembre 2017. <https://www.dw.com/en/how-do-offshore-wind-farms-affect-ocean-ecosystems/a-40969339> (consulté le 4 janvier 2023).
- [70] N. Niquil et A. Marechal, « Marine life: contrasting effects of offshore wind », *Polytechnique insights*, 19 janvier 2022. <https://www.polytechnique-insights.com/en/braincamps/energy/offshore-wind-drop-in-the-ocean-or-energy-tsunami/marine-life-contrasting-effects-of-offshore-wind/> (consulté le 4 janvier 2023).
- [71] A. Spyroudi, « End-of-life planning in offshore wind », ORE CATAPULT, avr. 2021. https://ore.catapult.org.uk/wp-content/uploads/2021/04/End-of-Life-decision-planning-in-offshore-wind_FINAL_AS-1.pdf (consulté le 4 janvier 2023).
- [72] I. Galparsoro *et al.*, « Reviewing the ecological impacts of offshore wind farms », *Npj Ocean Sustain.*, vol. 1, n° 1, p. 1, août 2022, doi: 10.1038/s44183-022-00003-5.
- [73] Z. Hutchison, D. Secor, et A. Gill, « The Interaction Between Resource Species and Electromagnetic Fields Associated with Electricity Production by Offshore Wind Farms », *Oceanography*, vol. 33, n° 4, p. 96-107, déc. 2020, doi: 10.5670/oceanog.2020.409.
- [74] DONG Energy et Vattenfall, « The Danish Offshore Wind Farm Demonstration Project: Horns Rev and Nysted Offshore Wind Farm Environmental impact assessment and monitoring », nov. 2006. <https://tethys.pnnl.gov/sites/default/files/publications/Horns-Rev-Nysted-2006.pdf> (consulté le 4 janvier 2023).
- [75] S. Degraer *et al.*, « Offshore Wind Farm Artificial Reefs Affect Ecosystem Structure and Functioning: A Synthesis », *Oceanography*, vol. 33, n° 4, p. 48-57, déc. 2020, doi: 10.5670/oceanog.2020.405.
- [76] United Nations Economic Commission for Europe, « Life Cycle Assessment of Electricity Generation Options », Organisation des Nations Unies, Genève, 2021. <https://unece.org/sites/default/files/2021-10/LCA-2.pdf> (consulté le 4 janvier 2023).
- [77] K&L Gates et SNC-Lavalin's Atkins, « U.S. Offshore Wind Handbook », oct. 2018. <https://www.snclavalin.com/~media/Files/S/SNC-Lavalin/download-centre/en/brochure/offshore-wind-brochure-en.pdf> (consulté le 4 janvier 2023).
- [78] D. H. Wilber, L. Brown, M. Griffin, G. R. DeCelles, et D. A. Carey, « Demersal fish and invertebrate catches relative to construction and operation of North America's first offshore wind farm », *ICES J. Mar. Sci.*, vol. 79, n° 4, p. 1274-1288, mai 2022, doi: 10.1093/icesjms/fsac051.
- [79] H. Bailey, K. L. Brookes, et P. M. Thompson, « Assessing environmental impacts of offshore wind farms: lessons learned and recommendations for the future », *Aquat. Biosyst.*, vol. 10, n° 1, p. 8, 2014, doi: 10.1186/2046-9063-10-8.
- [80] Frank Thomsen, Karin Lüdemann, Rudolf Kafemann, et Werner Piper, « Effects of offshore wind farm noise on marine mammals and fish », on behalf of COWRIE Ltd., Hambourg, Allemagne, juill. 2006. https://tethys.pnnl.gov/sites/default/files/publications/Effects_of_offshore_wind_farm_noise_on_marine-mammals_and_fish-1-.pdf
- [81] L. Bergström *et al.*, « Effects of offshore wind farms on marine wildlife—a generalized impact assessment », *Environ. Res. Lett.*, vol. 9, n° 3, p. 034012, mars 2014, doi: 10.1088/1748-9326/9/3/034012.
- [82] J. K. Kaldellis, D. Apostolou, M. Kapsali, et E. Kondili, « Environmental and social footprint of offshore wind energy. Comparison with onshore counterpart », *Renew. Energy*, vol. 92, p. 543-556, juill. 2016, doi: 10.1016/j.renene.2016.02.018.

- [83] P. H. Loring *et al.*, « Tracking Movements of Migratory Shorebirds in the US Atlantic Outer Continental Shelf Region », : US Department of the Interior, Bureau of Ocean Energy Management, Sterling (VA), OCS Study BOEM 2021-008, janv. 2021. <https://www.boem.gov/sites/default/files/documents/renewable-energy/studies/Tracking-Migratory-Shorebirds-Atlantic-OCS.pdf>
- [84] A. B. Gill, M. Desender, et L. G. Tugade, « Risk to Animals from Electromagnetic Fields Emitted by Electric Cables and Marine Renewable Energy Devices (Chapter 5) », dans *OES-Environmental 2020 State of the Science Report: Environmental Effects of Marine Renewable Energy Development Around the World. Report for Ocean Energy Systems (OES)*, Copping, A.E. and Hemery, L.G., editors, 2020, p. PNNL-29976, 1632878. doi: 10.2172/1632878.
- [85] National Oceanic and Atmospheric Administration NOAA, « Aquatic food webs », 1 février 2019. <https://www.noaa.gov/education/resource-collections/marine-life/aquatic-food-webs#:~:text=Primary%20producers%20%E2%80%94%20including%20bacteria%2C%20phytoplankton,energy%20without%20needing%20to%20eat.> (consulté le 4 avril 2023).
- [86] A. Spyroudi, « Carbon footprint of offshore wind farm components », ORE CATAPULT, avr. 2021. https://ore.catapult.org.uk/wp-content/uploads/2021/04/Carbon-footprint-of-offshore-wind-farm-components_FINAL_AS-3.pdf (consulté le 30 janvier 2023).
- [87] T. Kellner, « Closing The Loop: Group Unveils A Prototype Of A Recyclable Wind Turbine Blade », *GE*, 16 mars 2022. <https://www.ge.com/news/reports/closing-the-loop-group-unveils-a-prototype-of-a-recyclable-wind-turbine-blade> (consulté le 30 janvier 2023).
- [88] CanmetÉNERGIE, *Analyse juridictionnelle de la définition des zones propices au développement de l'énergie éolienne extracôtière*. Ottawa: Natural Resources Canada = Ressources naturelles Canada, 2020.
- [89] European Commission. European Climate, Infrastructure and Environment Executive Agency. *et al.*, *Overview of the effects of offshore wind farms on fisheries and aquaculture : final report*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2021. <https://data.europa.eu/doi/10.2826/63640> (consulté le 13 décembre 2022).
- [90] D. Boffey, « Dutch fishermen to sail fleet into Amsterdam in wind turbine protest », *The Guardian*, Stellendam (Pays-Bas), 1 juin 2018. <https://www.theguardian.com/environment/2018/jun/01/dutch-fishermen-to-sail-fleet-into-amsterdam-in-wind-turbine-protest> (consulté le 27 février 2023).
- [91] P. Legueltel, « Les parcs éoliens en mer ravivent la colère des pêcheurs », *Les Echos*, 7 novembre 2022. <https://www.lesechos.fr/pme-regions/normandie/les-parcs-eoliens-en-mer-ravivent-la-colere-des-pecheurs-1876562> (consulté le 12 décembre 2022).
- [92] Responsible Offshore Development Alliance, « Responsible Offshore Development Association to BOEM: Don't forget fishermen in the rush to expand wind energy », 7 avril 2021. <https://rodafisheries.org/letter-to-boem/> (consulté le 12 décembre 2022).
- [93] MERMAID, « Innovative Multi-purpose offshore platforms: planning, design & operation ». <https://www.vliz.be/projects/mermaidproject/index.html> (consulté le 13 décembre 2022).
- [94] S.-L. Billing *et al.*, « Combining wind power and farmed fish: Coastal community perceptions of multi-use offshore renewable energy installations in Europe », *Energy Res. Soc. Sci.*, vol. 85, p. 102421, mars 2022, doi: 10.1016/j.erss.2021.102421.
- [95] K. A. Abhinav *et al.*, « Offshore multi-purpose platforms for a Blue Growth: A technological, environmental and socio-economic review », *Sci. Total Environ.*, vol. 734, p. 138256, sept. 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138256.
- [96] The Crown Estate, « The Fishing Liaison with Offshore Wind and Wet Renewables Group ». <https://www.thecrownestate.co.uk/en-gb/what-we-do/on-the-seabed/our-partnerships/the-fishing-liaison-with-offshore-wind-and-wet-renewables-group/> (consulté le 13 décembre 2022).
- [97] N. A. Steins, J. A. Veraart, J. E. M. Klostermann, et M. Poelman, « Combining offshore wind farms, nature conservation and seafood: Lessons from a Dutch community of practice », *Mar. Policy*, vol. 126, p. 104371, avr. 2021, doi: 10.1016/j.marpol.2020.104371.
- [98] V. Westerberg, J. B. Jacobsen, et R. Lifran, « The case for offshore wind farms, artificial reefs and sustainable tourism in the French mediterranean », *Tour. Manag.*, vol. 34, p. 172-183, févr. 2013, doi: 10.1016/j.tourman.2012.04.008.
- [99] J. Ladenburg, « Attitudes towards offshore wind farms—The role of beach visits on attitude and demographic and attitude relations », *Energy Policy*, vol. 38, n° 3, p. 1297-1304, mars 2010, doi: 10.1016/j.enpol.2009.11.005.
- [100] T. Smythe, D. Bidwell, A. Moore, H. Smith, et J. McCann, « Beyond the beach: Tradeoffs in tourism and recreation at the first offshore wind farm in the United States », *Energy Res. Soc. Sci.*, vol. 70, p. 101726, déc. 2020, doi: 10.1016/j.erss.2020.101726.
- [101] M. B. Lilley, J. Firestone, et W. Kempton, « The Effect of Wind Power Installations on Coastal Tourism », *Energies*, vol. 3, n° 1, p. 1-22, janv. 2010, doi: 10.3390/en3010001.
- [102] A. Carr-Harris et C. Lang, « Sustainability and tourism: the effect of the United States' first offshore wind farm on the vacation rental market », *Resour. Energy Econ.*, vol. 57, p. 51-67, août 2019, doi: 10.1016/j.reseneeco.2019.04.003.
- [103] V. Westerberg, J. B. Jacobsen, et R. Lifran, « Offshore wind farms in Southern Europe – Determining tourist preference and social acceptance », *Energy Res. Soc. Sci.*, vol. 10, p. 165-179, nov. 2015, doi: 10.1016/j.erss.2015.07.005.
- [104] C.-O. Oh, J. Nam, et H. Kim, « The Impacts of Offshore Wind Farms on Coastal Tourists' Behaviors in South Korea », *Coast. Manag.*, p. 1-18, nov. 2022, doi: 10.1080/08920753.2023.2148848.
- [105] P. Lal *et al.*, « The Potential of Offshore Wind Energy Tourism in Ocean City, New Jersey », Montclair State University, nov. 2021. <https://www.montclair.edu/clean-energy-sustainability-analytics/wp-content/uploads/sites/151/2022/07/offshore-wind-energy-tourism-white-paper.pdf> (consulté le 14 décembre 2022).
- [106] European MSP Platform, « Conflict fiche 7: Maritime transport and offshore wind ». 23 février 2021. https://maritime-spatial-planning.ec.europa.eu/sites/default/files/sector/pdf/7_transport_offshore_wind_kg.pdf (consulté le 15 décembre 2022).
- [107] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, *Wind Turbine Generator Impacts to Marine Vessel Radar*. Washington, D.C.: National Academies Press, 2022, p. 26430. doi: 10.17226/26430.
- [108] Gouvernement du Canada, *Loi sur la Régie canadienne de l'énergie*. 2019. <https://laws-lois.justice.gc.ca/fra/lois/c-15.1/index.html>

- [109] Ressources naturelles Canada, *Initiative de règlement sur l'énergie renouvelable extracôtière*. <https://www.rncanengagenrcan.ca/fr/collections/initiative-de-reglement-sur-lenergie-renouvelable-extracotiere> (consulté le 15 décembre 2022).
- [110] Ressources naturelles Canada, « Règlement sur l'énergie renouvelable extracôtière - EXIGENCES TECHNIQUES PROPOSÉES », Gouvernement du Canada, 2021. <https://www.rncanengagenrcan.ca/fr/collections/initiative-de-reglement-sur-lenergie-renouvelable-extracotiere#t1> (consulté le 5 décembre 2022).
- [111] Gouvernement du Canada, *Loi sur les océans*. 1996, p. 56. <https://laws-lois.justice.gc.ca/PDF/O-2.4.pdf> (consulté le 4 avril 2023).
- [112] A. Turmel, « Canada: Oil And Gas In The Gulf Of St. Lawrence: From Exploration To Production », *Mondaq*, 23 août 2011. <https://www.mondaq.com/canada/oil-gas-electricity/142912/oil-and-gas-in-the-gulf-of-st-lawrence-from-exploration-to-production> (consulté le 31 mars 2023).
- [113] United Nations, *Convention on the Law of the Sea*. 1994. https://www.un.org/depts/los/convention_agreements/texts/unclos/unclos_e.pdf (consulté le 31 mars 2023).
- [114] Orsted, « Hornsea 1 Wind Farm ». <https://orsted.co.uk/energy-solutions/offshore-wind/our-wind-farms/hornsea1> (consulté le 31 mars 2023).
- [115] S. Mambra, « 5 Biggest Oil Platforms in the World », *Marine Insight*, 9 mars 2022. <https://www.marineinsight.com/offshore/5-biggest-oil-platforms-in-the-world/> (consulté le 31 mars 2023).
- [116] Gouvernement du Canada, « Biorégions marines fédérales », 20 avril 2020. <https://ouvert.canada.ca/data/fr/dataset/23eb8b56-dac8-4efc-be7c-b8fa11ba62e9> (consulté le 17 décembre 2022).
- [117] Gouvernement du Canada, « Carte des biorégions », 20 mars 2018. <https://www.dfo-mpo.gc.ca/oceans/maps-cartes/bioregions-fra.html> (consulté le 15 décembre 2022).
- [118] MaPP, « Marine Plan Partnership for the North Pacific Coast ». <http://mappocean.org/> (consulté le 5 janvier 2023).
- [119] Global Wind Energy Council, « Global Wind Report 2022 », GWEC, Bruxelles, avr. 2022. <https://gwec.net/wp-content/uploads/2022/03/GWEC-GLOBAL-WIND-REPORT-2022.pdf> (consulté le 2 novembre 2022).
- [120] Statista, « Installed electricity generation capacity in China from 2010 to 2021 », janvier 2022. <https://www.statista.com/statistics/302269/china-installed-power-generation-capacity/> (consulté le 2 novembre 2022).
- [121] International Energy Agency, « Offshore wind outlook 2019 (revised version) », IEA - International Energy Agency, France, nov. 2019. https://iea.blob.core.windows.net/assets/495ab264-4ddf-4b68-b9c0-514295ff40a7/Offshore_Wind_Outlook_2019.pdf (consulté le 2 novembre 2022).
- [122] Global Wind Energy Council, « Global Wind Report 2021 », GWEC, Bruxelles, mars 2021. <https://gwec.net/wp-content/uploads/2021/03/GWEC-Global-Wind-Report-2021.pdf> (consulté le 2 novembre 2022).
- [123] V. Henze, « Vestas Still Rules Turbine Market, But Challengers Are Closing In », *BloombergNEF*, Londres et New York, 18 février 2020. <https://about.bnef.com/blog/vestas-still-rules-turbine-market-but-challengers-are-closing-in/> (consulté le 9 novembre 2022).
- [124] V. Henze, « Global Wind Industry Had a Record, Near 100GW, Year as GE, Goldwind Took Lead From Vestas », *BloombergNEF*, Londres et New York, 10 mars 2021. <https://about.bnef.com/blog/vestas-still-rules-turbine-market-but-challengers-are-closing-in/> (consulté le 9 novembre 2022).
- [125] V. Henze, « Vestas Leaves Competitors Trailing as Wind Industry Posts Another Record Year of Almost 100 Gigawatts », *BloombergNEF*, Londres et New York, 23 mars 2022. <https://about.bnef.com/blog/vestas-still-rules-turbine-market-but-challengers-are-closing-in/> (consulté le 9 novembre 2022).
- [126] A. Buljan, « First Mediterranean Offshore Wind Farm Up and Running in Italy », *offshoreWIND.biz*, 22 avril 2022. <https://www.offshorewind.biz/2022/04/22/first-mediterranean-offshore-wind-farm-up-and-running-in-italy/> (consulté le 9 novembre 2022).
- [127] A. Buljan, « Goldwind Launches 12 MW Offshore Wind Turbine, Targets Chinese Market for Now », *offshoreWIND.biz*, 2 novembre 2021. <https://www.offshorewind.biz/2021/11/02/goldwind-launches-12-mw-offshore-wind-turbine-targets-chinese-market-for-now/> (consulté le 9 novembre 2022).
- [128] A. Durakovic, « GE Banned from Selling Haliade-X Offshore Wind Turbine in US, Two Projects Exempted », *offshoreWIND.biz*, 8 septembre 2022. <https://www.offshorewind.biz/2022/09/08/ge-banned-from-selling-haliade-x-offshore-wind-turbine-in-us-two-projects-exempted/> (consulté le 9 novembre 2022).
- [129] Reuters, « GE settles wind turbine patent disputes with Siemens Gamesa », 31 mars 2023. <https://www.reuters.com/legal/ge-settles-wind-turbine-patent-disputes-with-siemens-gamesa-2023-03-31/> (consulté le 19 juillet 2023).
- [130] Hyöty Tuuli, « Tahkoluoto offshore wind farm ». <https://hyotytuuli.fi/en/wind-farms/tahkoluoto-offshore-wind-farm/> (consulté le 23 novembre 2022).
- [131] Energy Numbers, « UK offshore wind capacity factors », 19 juin 2022. <https://energynumbers.info/uk-offshore-wind-capacity-factors> (consulté le 28 novembre 2022).
- [132] Vineyard Wind, « Nation's first commercial-scale offshore wind project ». <https://www.vineyardwind.com/vineyardwind-1> (consulté le 28 novembre 2022).
- [133] Vineyard Wind LLC et Epsilon Associates, Inc., « Draft Construction and Operations Plan Volume 1 Vineyard Wind Project », submitted to the Bureau of Ocean Energy Management, Massachusetts, juin 2020. <https://www.boem.gov/sites/default/files/documents/renewable-energy/Vineyard-Wind-COP-Volume-1-Section-1.pdf> (consulté le 28 novembre 2022).
- [134] IRENA, « Renewable Power Generation Costs in 2021 », International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2022.
- [135] DNV, « Energy Transition Outlook 2022 - A global and regional forecast to 2050 ». <https://www.dnv.com/energy-transition-outlook/index.html>
- [136] Commission Européenne, « Plan REPowerEU », Bruxelles, SWD(2022) 230 final, mai 2022. https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:fc930f14-d7ae-11ec-a95f-01aa75ed71a1.0003.02/DOC_1&format=PDF (consulté le 27 février 2023).

- [137] M. Frederiksen, A. de Croo, M. Rutte, et O. Scholz, « THE ESBJERG DECLARATION on The North Sea as a Green Power Plant of Europe », 18 mai 2022. [https://en.kefm.dk/Media/637884571703277400/The%20Esbjerg%20Declaration%20\(002\).pdf](https://en.kefm.dk/Media/637884571703277400/The%20Esbjerg%20Declaration%20(002).pdf) (consulté le 27 février 2023).
- [138] Gouvernement du Royaume-Uni, « British Energy Security Strategy - Secure, clean and affordable British energy for the long term », Londres, avr. 2022. <https://www.gov.uk/government/publications/british-energy-security-strategy> (consulté le 29 novembre 2022).
- [139] The Federal Government (of Germany), « More wind energy at sea », 6 avril 2022. <https://www.bundesregierung.de/breg-en/search/offshore-wind-energy-act-2024112> (consulté le 9 janvier 2023).
- [140] Offshore staff, « Report: Denmark not quite on track to meet 2030 wind target », *Offshore*, Oslo, Norvège, 16 novembre 2022. <https://www.offshore-mag.com/renewable-energy/article/14285824/report-denmark-not-quite-on-track-to-meet-2030-wind-target> (consulté le 9 janvier 2023).
- [141] Gouvernement des Pays-Bas, « Offshore wind energy ». <https://www.government.nl/topics/renewable-energy/offshore-wind-energy#:~:text=Consequently%2C%20some%2021%20GW%27s%20worth,offshore%20wind%20farms%20are%20considerable.> (consulté le 21 novembre 2021).
- [142] Ministère de la Transition Écologique et Solidaire, « Synthèse - Stratégie Française Pour l'Énergie et le Climat: Programmation Pluriannuelle de l'Énergie 2019-2023 2024-2028 », République Française, oct. 2022. <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/20200422%20Synthe%CC%80se%20de%20la%20PPE.pdf> (consulté le 2 décembre 2022).
- [143] the White House, « FACT SHEET: Biden Administration Jumpstarts Offshore Wind Energy Projects to Create Jobs », mars 2021. <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2021/03/29/fact-sheet-biden-administration-jumpstarts-offshore-wind-energy-projects-to-create-jobs/> (consulté le 5 décembre 2022).
- [144] A. Buljan, « Taiwan Drafts Plan for Further 5 GW of Offshore Wind », *offshoreWIND.biz*, 11 mai 2021. <https://www.offshorewind.biz/2021/05/11/taiwan-drafts-plan-for-further-5-gw-of-offshore-wind/> (consulté le 9 janvier 2023).
- [145] K. Vu, « Vietnam needs \$8 billion-\$14 billion power investment a year through 2030 - minister », *Reuters*, 10 août 2022. <https://www.reuters.com/business/sustainable-business/vietnam-needs-8-bln-14-bln-power-investment-year-through-2030-minister-2022-08-10/#:~:text=An%20said%20Vietnam%2C%20which%20pledged,coal%20in%20its%20energy%20mix.> (consulté le 9 janvier 2023).
- [146] Offshore staff, « Repowering could revitalize India's wind sector as auctions drive investments », *Offshore*, 5 octobre 2022. <https://www.offshore-mag.com/renewable-energy/article/14283818/repowering-could-revitalize-indias-wind-sector-as-auctions-drive-investments> (consulté le 9 janvier 2023).
- [147] A. Durakovic, « Japan Launches Third Offshore Wind Auction », *offshoreWIND.biz*, 10 décembre 2021. <https://www.offshorewind.biz/2021/12/10/japan-launches-third-offshore-wind-auction/> (consulté le 9 janvier 2023).

- [148] WindEurope, « Industry position on how offshore grids should develop », juin 2019. <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/policy/position-papers/WindEurope-Industry-position-on-how-offshore-grids-should-develop.pdf>
- [149] J. S. González et R. Lacal-Aránegui, « A review of regulatory framework for wind energy in European Union countries: Current state and expected developments », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 56, p. 588-602, avr. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.11.091.
- [150] WindEurope, « Europe's building only half the wind energy it needs for the Green Deal, supply chain is struggling as a result », 24 février 2022. <https://windeurope.org/newsroom/press-releases/europes-building-only-half-the-wind-energy-it-needs-for-the-green-deal-supply-chain-is-struggling-as-a-result/>
- [151] WindEurope, « European wind energy supply chain struggling, Green Deal at risk », 22 février 2022. <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/policy/position-papers/20220222-WindEurope-letter-to-President-von-der-Leyen.pdf> (consulté le 25 novembre 2022).
- [152] Department for Business, Energy and Industrial Strategy (BEIS), « Offshore wind Sector Deal », 4 mars 2020. <https://www.gov.uk/government/publications/offshore-wind-sector-deal/offshore-wind-sector-deal> (consulté le 6 mars 2023).
- [153] Direction générale du commerce de l'Union Européenne, « EU challenges discriminatory practices of UK's green energy subsidy scheme at WTO », 28 mars 2022. https://policy.trade.ec.europa.eu/news/eu-challenges-discriminatory-practices-uks-green-energy-subsidy-scheme-wto-2022-03-28_en (consulté le 6 mars 2023).
- [154] Z. Kaplan, T. Crowards, et Michael Warner, « U.S. Federal and State Local Content Requirements for Offshore Wind Projects », DAI, févr. 2023. <https://www.dai.com/news/dai-publishes-review-of-us-offshore-wind-local-content-requirements> (consulté le 6 mars 2023).
- [155] International Renewable Energy Agency (IRENA), « Renewable Energy Statistics 2022 », IRENA, Abu Dhabi, 2022.
- [156] R. Chen, « Is offshore wind development in Mainland China sustainable without subsidy? », *Westwood Global Energy Group*, 22 novembre 2022. <https://www.westwoodenergy.com/news/westwood-insight/westwood-insight-is-offshore-wind-development-in-mainland-china-sustainable-without-subsidy>
- [157] Y. Wei, Q.-P. Zou, et X. Lin, « Evolution of price policy for offshore wind energy in China: Trilemma of capacity, price and subsidy », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 136, p. 110366, févr. 2021, doi: 10.1016/j.rser.2020.110366.
- [158] Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP), « Offshore Wind Technical Potential - Analysis and Maps », 20 juillet 2021. https://esmap.org/esmap_offshorewind_techpotential_analysis_maps#:~:text=The%20offshore%20wind%20technical%20potential,%2C%20social%2C%20or%20economic%20constraints. (consulté le 25 novembre 2022).
- [159] ORE CATAPULT, « UK offshore wind history ». <https://guidetoanoffshorewindfarm.com/offshore-wind-history> (consulté le 28 novembre 2022).

- [160] The Crown Estate, « Offshore Wind Report 2021 », Londres, avr. 2022.
- [161] Department for Business, Energy and Industrial Strategy (BEIS), « Digest of UK Energy Statistics (DUKES) - 6.2: Capacity of, and electricity generation from, renewable sources », 28 juillet 2022. <https://www.gov.uk/government/statistics/renewable-sources-of-energy-chapter-6-digest-of-united-kingdom-energy-statistics-dukes>
- [162] The Crown Estate, « Offshore Wind Leasing Round 4 », 28 novembre 2022. <https://www.thecrownestate.co.uk/round-4/>
- [163] Statista, « Monthly average electricity prices based on day-ahead baseload contracts in Great Britain from January 2015 to March 2022 », 13 mai 2022. <https://www.statista.com/statistics/589765/average-electricity-prices-uk/> (consulté le 29 novembre 2022).
- [164] The Crown Estate, « A buoyant opportunity in the Celtic Sea », dans *Integrated Annual Report and Accounts 2021/22*, 2022. <https://www.thecrownestate.co.uk/annual-report-2022/a-buoyant-opportunity-in-the-celtic-sea/> (consulté le 28 novembre 2022).
- [165] Gouvernement du Royaume-Uni, « Contracts for Difference (CfD) Allocation Round 4: results », 7 juillet 2022. <https://www.gov.uk/government/publications/contracts-for-difference-cfd-allocation-round-4-results> (consulté le 29 novembre 2022).
- [166] A. Durakovic, « UK to Hold Yearly Contracts for Difference Auctions from 2023 Onwards », *offshoreWIND.biz*, 9 février 2022. <https://www.offshorewind.biz/2022/02/09/uk-to-hold-yearly-contracts-for-difference-auctions-from-2023-onwards/> (consulté le 28 novembre 2022).
- [167] France Énergie Éolienne, « Enjeux et Perspectives ». <https://fee.asso.fr/eolien-en-mer/enjeux-et-perspectives/> (consulté le 30 novembre 2022).
- [168] Parc éolien en mer de St-Nazaire, « Présentation du projet ». <https://parc-eolien-en-mer-de-saint-nazaire.fr/> (consulté le 30 novembre 2022).
- [169] H. Roussel, « Le parc éolien en mer au large de Saint-Nazaire mis en service, en pleine crise énergétique », *France Bleu Loire Océan*, Saint-Nazaire, 23 novembre 2022. <https://www.francebleu.fr/infos/economie-social/le-parc-eolien-en-mer-au-large-de-saint-nazaire-mis-en-service-en-pleine-crise-energetique-1669214951> (consulté le 30 janvier 2023).
- [170] Ricottier, S, Chopin, A, Martel, M, Niewenglowski, M, Tribouart, A, et Berbett-Justice, C, « Éoliennes en mer : une première éolienne installée en France, en retard sur ses voisins », *Franceinfo*, 12 avril 2022. https://www.francetvinfo.fr/economie/energie/eoliennes-en-mer-une-premiere-eolienne-installee-en-france-en-retard-sur-ses-voisins_5078653.html (consulté le 30 novembre 2022).
- [171] J.-F. Landel, A. Mouchard, I. Wallard, N. Mariel, et F. Dambrine, « La simplification des procédures d'autorisation applicables aux éoliennes en mer », Conseil Général de l'Environnement et du Développement Durable, Conseil Général de l'Économie, Inspection Générale des Affaires Maritimes, CGEDD n° 013619-01, n° 2021/02/CGE/SG, n° IGAM 2021-060, juin 2021. https://www.economie.gouv.fr/files/files/directions_services/cge/autorisation-eolienne.pdf?v=1642516230 (consulté le 30 novembre 2022).
- [172] Ministère de la Transition Écologique et Solidaire, « FICHE N°8 Pourquoi et comment l'État a-t-il choisi de soutenir le développement de l'éolien en mer en France ? », République Française. https://www.eoliennesenmer.fr/sites/eoliennesenmer/files/fichiers/2021/07/EES_AO6_Fiche8_WEB_0.pdf (consulté le 29 novembre 2022).
- [173] Vie publique - Au coeur du débat public, « Loi du 10 mars 2023 relative à l'accélération de la production d'énergies renouvelables », *République Française*, 13 mars 2023. <https://www.vie-publique.fr/loi/286391-energies-renouvelables-loi-du-10-mars-2023> (consulté le 4 mai 2023).
- [174] J.-M. Bezat, « Eolien flottant : le projet de Groix-Belle-Ile tombe à l'eau », *Le Monde*, 16 novembre 2022. https://www.lemonde.fr/economie/article/2022/11/16/eolien-flottant-le-projet-de-groix-belle-ile-tombe-a-l-eau_6150172_3234.html (consulté le 30 novembre 2022).
- [175] Éoliennes en mer en France, « Présentation », *Ministère de la Transition Énergétique*. <https://www.eoliennesenmer.fr/presentation> (consulté le 30 novembre 2022).
- [176] A. Lopez, R. Green, T. Williams, E. Lantz, G. Buster, et B. Roberts, « Offshore Wind Energy Technical Potential for the Contiguous United States », National Renewable Energy Laboratory (NREL), août 2022. <https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/83650.pdf> (consulté le 5 décembre 2022).
- [177] U.S. Department of Energy, « Floating Offshore Wind Shot », 2022. <https://www.energy.gov/eere/wind/floating-offshore-wind-shot> (consulté le 5 décembre 2022).
- [178] Bureau of Ocean Energy Management (BOEM), « Wind Energy Commercial Leasing Process », Government of the United States of America, mai 2021. <https://www.boem.gov/sites/default/files/documents/about-boem/Wind-Energy-Comm-Leasing-Process-FS-01242017Text-052121Branding.pdf> (consulté le 5 décembre 2022).
- [179] P. Beiter, J. Heeter, et P. Spitsen, « Comparing Offshore Wind Energy Procurement and Project Revenue Sources Across U.S. States », National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO, NREL/TP-5000-76079, juin 2020. <https://www.nrel.gov/docs/fy20osti/76079.pdf> (consulté le 5 décembre 2022).
- [180] Bureau of Ocean Energy Management (BOEM), *Renewable Energy Modernization Rule*. 2023. <https://www.boem.gov/renewable-energy/regulatory-framework-and-guidelines> (consulté le 30 janvier 2023).
- [181] D. Vakil, « U.S. to simplify offshore wind regulations to meet climate goals », *Reuters*, 12 janvier 2023. <https://www.reuters.com/business/environment/us-simplify-offshore-wind-regulations-meet-climate-goals-2023-01-12/> (consulté le 30 janvier 2023).
- [182] Offshore staff, « UK/US study assesses wake steering for floating wind », *Offshore*, Oslo, Norway, 8 juillet 2021. <https://www.offshore-mag.com/renewable-energy/article/14206447/ukus-study-assesses-wake-steering-for-floating-wind> (consulté le 28 novembre 2022).
- [183] NS ENERGY, « Kincardine Floating Offshore Wind Farm, Scotland ». <https://www.nsenergybusiness.com/projects/kincardine-floating-offshore-wind-farm-scotland/> (consulté le 28 novembre 2022).
- [184] Department for Business, Energy and Industrial Strategy (BEIS), « £60 million boost for floating offshore wind », *Gouvernement du Royaume-Uni*, 25 janvier 2022. <https://www.gov.uk/government/news/60-million-boost-for-floating-offshore-wind> (consulté le 30 janvier 2023).
- [185] National Weather Service of NOAA, « What is a Nor'easter? » <https://www.weather.gov/safety/winter-noreaster> (consulté le 21 décembre 2022).

- [186] Environnement Canada, « Chapitre 7 - Atlantic Region », dans *Canada's National Programme of Action for the protection of the marine environment from land-based activities*, Ottawa (Ontario): Gouvernement du Canada, 2000. <https://publications.gc.ca/collections/Collection/En21-204-2000-6E.pdf> (consulté le 16 décembre 2022).
- [187] B. A. O'Grady et B. Moody, « Nova Scotia », *Britannica*. 5 décembre 2022. <https://www.britannica.com/place/Nova-Scotia> (consulté le 16 décembre 2022).
- [188] H. Breeze et T. Horsman, *La plate-forme Néo-Écossaise : atlas des activités humaines*. Dartmouth, N.S.: Oceans and Coastal Management Division, Oceans and Habitat Branch, Fisheries and Oceans Canada (Maritimes Region), 2005.
- [189] Gouvernement du Canada, « Canada's National Marine Conservation Areas System Plan - Scotian Shelf », *National Marine Conservation Areas of Canada*, 17 novembre 2006. https://web.archive.org/web/20070217223925/http://www.pc.gc.ca/progs/amnc-nmca/systemplan/itm2-atl10_E.asp (consulté le 31 mars 2023).
- [190] Aivek Stantec Limited Partnership, « Labrador Shelf Offshore Area Strategic Environmental Assessment Update », Canada-Newfoundland and Labrador Offshore Petroleum Board, 121414574, déc. 2021. <https://www.cnlopb.ca/wp-content/uploads/sealab/lisup1-4.pdf> (consulté le 16 décembre 2022).
- [191] Department of Industry, Energy, and Technology Newfoundland and Labrador, « Bathymetric Profile Tool 2.0 », 2021. <https://iet-gis.maps.arcgis.com/apps/Profile/index.html?appid=9580a32a04834b62a354e804ae19c78e> (consulté le 21 décembre 2022).
- [192] J. B. R. Eamer, J. Shaw, E. L. King, et K. MacKillop, « The inner shelf geology of Atlantic Canada compared with the North Sea and Atlantic United States: Insights for Atlantic Canadian offshore wind energy », *Cont. Shelf Res.*, vol. 213, p. 104297, janv. 2021, doi: 10.1016/j.csr.2020.104297.
- [193] Séismes Canada et Ressources naturelles Canada, « Recherche de séismes dans la base de données », 6 avril 2021. <https://earthquakescanada.nrcan.gc.ca/stndon/NEDB-BNDS/bulletin-fr.php> (consulté le 21 décembre 2022).
- [194] Pêches et Océans Canada, « Zones de protection marines de la Loi sur les océans », Gouvernement du Canada, 30 novembre 2021. <https://open.canada.ca/data/fr/dataset/a1e18963-25dd-4219-a33f-1a38c4971250> (consulté le 21 décembre 2022).
- [195] Pêches et Océans Canada, « Zones d'importance écologique et biologique », Gouvernement du Canada, 30 novembre 2021. <https://ouvert.canada.ca/data/fr/dataset/d2d6057f-d7c4-45d9-9fd9-0a58370577e0> (consulté le 21 décembre 2022).
- [196] Service canadien des glaces et Environnement et Changement climatique Canada, « Normales climatiques des glaces sur 30 ans », Gouvernement du Canada, 29 novembre 2021. <https://iceweb1.cis.ec.gc.ca/30Atlas/page1.xhtml?lang=fr> (consulté le 21 décembre 2022).
- [197] Pêches et Océans Canada, « Canada's Fisheries Fast Facts 2021 », février 2022. https://waves-vagues.dfo-mpo.gc.ca/library-bibliotheque/41039634.pdf?_gl=1*w8s93q*_ga*M-zY4MTGxOTQxLjE2NzExMjU5MTc.*_ga_7CCSB32R7T*MTY3MTc0MzUwNC4zL-jAuMTY3MTc0MzUwNC4wLjAuMA (consulté le 21 décembre 2022).
- [198] Transport et Mobilité durable, « Avantage Saint-Laurent – Près de 7,8 M\$ d'investissements pour le port de Gaspé ». Gouvernement du Québec, 16 mai 2022. <https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/salle-de-presse/nouvelles/Pages/investissements-pour-le-port-de-Gaspe.aspx> (consulté le 21 décembre 2022).
- [199] J.-P. Thibault, « Près de 170 M\$ et 200 nouveaux emplois chez LM Wind Power », *Gaspésie Nouvelles*, Gaspé, Qc, 14 juillet 2021. <https://www.gaspesienouvelles.com/article/2021/07/14/pres-de-170-m-et-200-nouveaux-emplois-chez-lm-wind-power> (consulté le 27 février 2023).
- [200] Port of Halifax, « Fact Sheet », 2019. <https://www.portofhalifax.ca/about-us/resources/fact-sheet/> (consulté le 4 mai 2023).
- [201] Port Saint John, « Port Map ». <https://www.sjport.com/port-map> (consulté le 4 mai 2023).
- [202] MarineTraffic, « Density Maps ». <https://www.marinetraffic.com/en/ais/home/centerx:-83.8/centery:45.4/zoom:6> (consulté le 19 décembre 2022).
- [203] Clear Seas - Centre for responsible marine shipping, « Vessel Traffic in Canada's Pacific Region », déc. 2020. <https://clearseas.org/wp-content/uploads/2021/02/VTA-Pacific-Final-Report-EN.pdf> (consulté le 19 décembre 2022).
- [204] Pacific North Coast Integrated Management Area (PNCIMA) Initiative, « Pacific North Coast Integrated Management Area Plan », PNCIMA Initiative, 2017. <https://coastalfirstnations.ca/wp-content/uploads/2017/06/PNCIMA-Plan-IOAC.pdf> (consulté le 19 décembre 2022).
- [205] J. V. Barrie et K. W. Conway, « Seabed characterization for the development of marine renewable energy on the Pacific margin of Canada », *Cont. Shelf Res.*, vol. 83, p. 45-52, juill. 2014, doi: 10.1016/j.csr.2013.10.016.
- [206] Pacific North Coast Integrated, « Atlas of the Pacific North Coast Integrated Management Area », PNCIMA Initiative, mai 2011. https://aeic-iaac.gc.ca/050/documents_staticpost/cearref_21799/83896/Atlas_of_the_Pacific_North_Coast.pdf (consulté le 19 décembre 2022).
- [207] Northland Power, « 2022 Annual Report », févr. 2023. <https://www.northlandpower.com/en/resources/Corporate%20Reports/NPI-2022-Annual-Report-FINAL.pdf>
- [208] Weather Spark, « Climate and Average Weather Year Round in Prince Rupert ». <https://weatherspark.com/y/298/Average-Weather-in-Prince-Rupert-Canada-Year-Round#:~:text=Prince%20Rupert%20experiences%20some%20seasonal,average%20snowfall%20of%203.4%20inches> (consulté le 21 décembre 2022).
- [209] Bibliothèque du Parlement, « Statistiques de 2018 sur les pêches commerciales au Canada », Gouvernement du Canada, juin 2020. <https://notesdelacolline.ca/2020/06/01/statistiques-de-2018-sur-les-peches-commerciales-au-canada/> (consulté le 22 décembre 2022).
- [210] Pêches et Océans Canada, « Programme de retrait des permis de pêche commerciale du saumon du Pacifique », 14 décembre 2022. <https://www.pac.dfo-mpo.gc.ca/fm-gp/salmon-saumon/comm-licence-retrait-retrait-permis/index-fra.html> (consulté le 22 décembre 2022).
- [211] R. Baker, « Feds leaving West Coast fishing sector to flounder after salmon closures, harvesters say », *Toronto Star*, 7 mars 2022. <https://www.thestar.com/news/canada/2022/03/07/feds-leaving-west-coast-fishing-sector-to-flounder-after-salmon-closures-harvesters-say.html> (consulté le 22 décembre 2022).

- [212] Marine Navigation App, « Fishing app ». <https://fishing-app.gpsnauticalcharts.com/i-boating-fishing-web-app/fishing-marine-charts-navigation.html#9.21/37.6674/-122.3396> (consulté le 22 décembre 2022).
- [213] Prince Rupert Port Authority, « Port Description and Navigation ». https://www.rupertport.com/info_guide/7-port-description/#~:text=Prince%20Rupert%20Harbour%20is%20a,at%20least%2035%20metres%20deep (consulté le 22 décembre 2022).
- [214] United States Environmental Protection Agency (U.S. EPA), « Facts and Figures about the Great Lakes », 11 août 2022. <https://www.epa.gov/greatlakes/facts-and-figures-about-great-lakes> (consulté le 22 décembre 2022).
- [215] Statistique Canada, « Chiffres de population et des logements : Canada et centres de population », 9 février 2022. https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/fr/tv.action?pid=9810001101&request_locale=fr (consulté le 22 décembre 2022).
- [216] Independent Electricity System Operator (IESO), « Reliability Outlook - An adequacy assessment of Ontario's electricity system October 2022 to March 2024 », sept. 2022. <https://www.ieso.ca/en/Sector-Participants/Planning-and-Forecasting/Reliability-Outlook> (consulté le 22 décembre 2022).
- [217] United States Environmental Protection Agency (U.S. EPA), « Physical Features of the Great Lakes ». <https://www.epa.gov/greatlakes/physical-features-great-lakes> (consulté le 22 décembre 2022).
- [218] Great Lakes St. Lawrence Seaway System, « Locks, Canals & Channels ». <https://greatlakes-seaway.com/en/the-seaway/our-locks-and-channels/> (consulté le 22 décembre 2022).
- [219] Great Lakes Environmental Research Laboratory et National Oceanic and Atmospheric Administration NOAA, « Great Lakes Ice Cover », 2020. <https://www.glerl.noaa.gov/data/ice/#historical> (consulté le 22 décembre 2022).
- [220] J. Marty et A. Nicoll, « Environmental Sensitivity to Oil Exposure in the Great Lakes Waters: A Multimodal Approach », 2017, doi: 10.13140/RG.2.2.32612.99202.
- [221] Ontario Commercial Fisheries' Association, « Fisheries Statistics 1994 to 2021 - 2021 All Ontario Stats ». <https://www.ocfa.ca/fisheries-industry/fisheries-statistics> (consulté le 22 décembre 2022).
- [222] MNP, « Economic Impact Study of Ontario's Commercial Fishing and Fish Processing Industries », on behalf of the Ontario Commercial Fisheries' Association, janv. 2015. <https://www.ocfa.ca/downloads/2015-economic-impact-study.pdf> (consulté le 22 décembre 2022).
- [223] HOPA Ports, « Port of Hamilton ». <https://www.hopaports.ca/locations/port-of-hamilton/> (consulté le 22 décembre 2022).
- [224] QSL, « Hamilton ». <https://qsl.com/our-network/hamilton/> (consulté le 22 décembre 2022).

Annexes

A. Impact de l'éolien extracôtier sur la faune marine [8]

Groupe biologique	Étape de projet	Source d'impact	Exemple d'impacts potentiels
Organismes benthiques	Construction	Perturbation des sédiments	Augmentation de la turbidité, réduisant la pénétration de la lumière, ce qui limite la croissance (-) Étouffement des organismes benthiques et suspension des polluants (-)
		Bruits et vibrations de battage de pieux	Une étude plus approfondie est requise pour une quantification appropriée (-)
		Empreintes des bases de turbines et des zones de câbles	Déplacement et perte d'espèces et d'habitats (-), Réduction de l'abondance et de la diversité
	Exploitation	Bruits et vibrations d'opération	Une étude plus approfondie est requise pour une quantification appropriée (-)
		Réduction de l'activité de pêche	Augmentation de la population (+), changements dans la composition de la communauté (-)
		Effet sur les récifs artificiels	Colonisation, attraction de poissons (+)
		Présence de structures	Changements hydrographiques, impacts sur la stratification qui affectent la production primaire locale et le flux de carbone vers le benthos (-)
	Poissons	Construction	Perturbation des sédiments
Bruits et vibrations de battage de pieux			Déplacement, blessure physique (-)
Exploitation		Champs électromagnétiques provenant des câbles	Troubles d'orientation, comportement d'évitement (-)
		Bruits et vibrations d'opération	Relocalisation permanente potentielle (-)
		Fondations des turbines	Réduction des impacts de la pêche (+)
Mammifères marins		Construction	Bruits et vibrations du battage de pieux
	Circulation des navires de construction		Collisions causant des dommages physiques ou la mortalité (-)
	Exploitation	Bruits et vibrations d'opération	Relocalisation permanente potentielle (-)
		Circulation des navires d'entretien	Collisions causant des dommages physiques ou la mortalité (-)
Oiseaux	Construction et exploitation	Émissions sonores	Perturbation de la reproduction et de la migration (-)
	Construction	Circulation des navires de construction	Relocalisation, attraction à la lumière (-)
	Exploitation	Pales en rotation	Mortalités causées par des collisions (-)
		Obstacles pour les éoliennes	Relocalisation, perte d'habitat, évitement de vol, perturbation de la migration (-)
		Émissions lumineuses	Attraction aux feux de navigation (-)
	Circulation des navires d'entretien	Relocalisation, attraction à la lumière (-)	
	Effet sur les récifs artificiels	Attraction (-/+)	

B. Liste non exhaustive d'entreprises et organismes au Canada œuvrant dans des secteurs en lien avec l'éolien extracôtier

Nom	Localisation	Services	Projets
Enbridge	QC	Producteur	3 parcs éoliens extracôtiers en France
Northland Power	ON	Producteur	Propriétaire minoritaire de trois parcs éoliens extracôtiers en mer du Nord. Possède des droits de construction pour plusieurs autres parcs en Allemagne, en Écosse, en Corée du Sud et à Taïwan
EDP Renewables North America	ON	Producteur	Ocean Winds : alliance entre EDP et Engie, plusieurs parcs éoliens extracôtiers en Europe, aux É.-U. et 1 en Corée du Sud
Pattern Energy Canada	ON	Opérateur	Ishikari Offshore Wind : Plus grand parc éolien extracôtier du Japon
Samsung Renewable Energy	ON	Opérateur	Fife Energy Park au R.-U. Samsung Heavy Industries : Modèle de plateformes flottantes pour éoliennes extracôtiers
Invenergy Canada	ON	Opérateur	Possède un bail pour un parc éolien extracôtier aux É-U dans le New York Bight maintenant connu sous le nom de Leading Light Wind
ABB Inc	QC	Construction, fabrication et maintenance	Fournisseur de composants électriques, de systèmes et de services de l'éolien extracôtier L'un des leaders mondiaux dans l'intégration de solutions électriques, d'automatisation et de télécommunications pour les actifs offshore Parc éolien extracôtier Alpha Ventus
Marmen	QC	Construction, fabrication et maintenance	Fabrication de tours d'éoliennes pour l'extracôtier
LM Wind Power	QC	Construction, fabrication et maintenance	Fabrication de pales d'éoliennes extracôtiers

Graham Group Canada	AB	Construction, fabrication et maintenance	Construction et installation de l'un des plus grands prototypes d'éoliennes extracôtiers de 7 MW au parc éolien de Fife Energy à Methil, en Écosse
Vestas Canada	ON	Construction, fabrication et maintenance	A ouvert sa première usine en Amérique du Nord, à Windsor, au Colorado Développement, fabrication et installation d'éoliennes extracôtiers
WSP	QC	Génie-conseil	Appui stratégique dans le cadre du projet éolien en mer du Kattegatt, en Suède Au nombre de ses clients : ScottishPower Renewables, Equinor, npower Renewables, NorWind, Siemens T&D, Vestas et Scottish & Southern Energy
AECOM Canada	QC	Génie-conseil	New Jersey Wind Port Project aux États-Unis
STANTEC Consulting	QC	Génie-conseil	Participe à plusieurs projets extracôtiers, notamment : Vineyard Wind 1 Park, City Wind Project South Fork Wind Wolfe Island Offshore Wind Project
Ramboll Group	ON	Génie-conseil	Projet Coastal Virginia Offshore Wind (CVOW) Projets Aflandshage et Nordre Flint
Heddle Shipyards	QC	Services maritimes	La plus grande entreprise canadienne de réparation et de construction navale sur les Grands Lacs
BBC Chartering Canada	QC	Services maritimes	The Greater Changhua Offshore Wind Farm
Seadrill Canada	NL	Forage extracôtier	Leur expérience acquise dans le domaine gazier et pétrolier est transférable au domaine éolien extracôtier.
Transocean Offshore Canada	NL	Forage extracôtier	
Noble Drilling Canada	NL	Forage extracôtier	

The image features a large, stylized white graphic on a blue background. The graphic consists of two main elements: a vertical bar on the left and a shape on the right that resembles the letters 'N' and 'I' combined. The background is a solid blue color with a pattern of thin, light blue, wavy lines that create a sense of movement and depth. The white graphic is centered horizontally and vertically, with the 'N' and 'I' shapes overlapping each other. The overall design is clean and modern, with a strong color contrast between the white and blue.