

Office Français de la
Biodiversité



Retours d'expériences sur le suivi des effets des parcs éoliens en mer étrangers sur la biodiversité

Phase 1 – Présentation des parcs éoliens
en mer en exploitation en Europe

5 décembre 2024

Synthèse du rapport de la
phase 1



L'expansion de l'éolien en mer s'accélère actuellement dans le monde entier. La France s'est fixée des objectifs ambitieux de développement pour répondre aux engagements qu'elle a pris en matière d'augmentation des énergies renouvelables et de lutte contre le changement climatique. La programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) 2019-2028 prévoit l'attribution de près de 4 GW d'éolien en mer entre 2019 et 2024, puis au moins 1 GW par an à partir de 2024. Les travaux de planification spatiale de l'éolien en mer nécessitent de disposer de toute la connaissance disponible sur les enjeux environnementaux, notamment au regard des effets possibles de l'éolien en mer sur la biodiversité marine qui ne sont pas encore totalement compris. Ces effets sont étudiés dans différents pays par le biais de diverses méthodes et programmes de surveillance, mais l'échange d'informations entre les pays n'est pas toujours effectué.

Une étude, commandée à Biotope par l'Observatoire national de l'éolien en mer et débutée en 2023, consiste à étudier et analyser les retours d'expériences étrangers concernant les effets des parcs éoliens en mer (PEM) sur la biodiversité. Le but de ce travail est d'informer au mieux le public, les décideurs et les acteurs du secteur maritime français, d'analyser le caractère transposable des résultats aux conditions environnementales de la France métropolitaine, et de préciser dans quelles mesures les expériences étrangères peuvent éclairer la manière de procéder en France.

Cette étude comporte trois grandes phases :

- Phase 1 : Recensement des parcs éoliens en mer en exploitation et étude de leurs caractéristiques ;
- Phase 2 : Étude de la gouvernance des différents pays ;
- Phase 3 : Analyse des protocoles de suivi, des effets sur l'environnement et des mesures ERC.

Le présent document est la synthèse du rapport de la phase 1 décrivant les PEM et leurs caractéristiques.

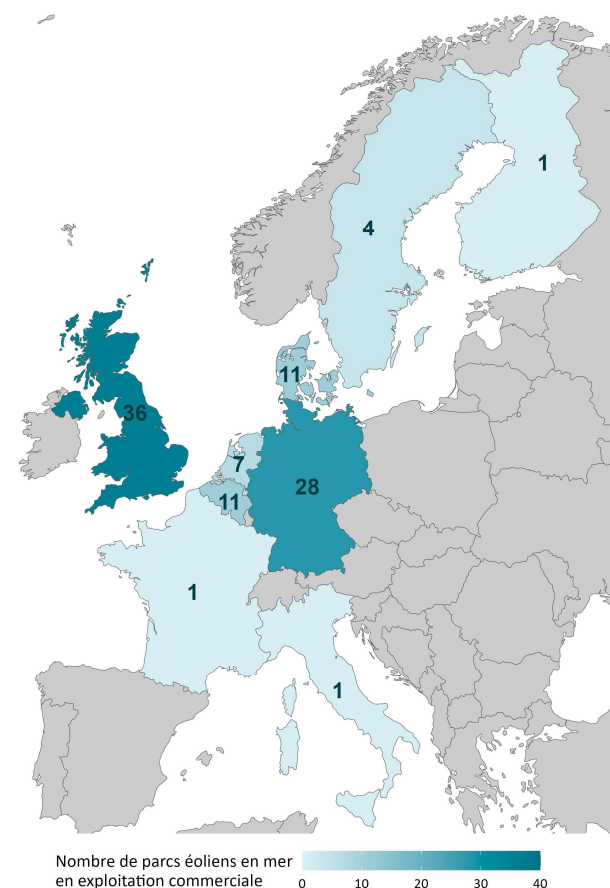
Cette étude est réalisée sur les PEM présents en Europe uniquement. C'est en Europe que les retours d'expérience sur les PEM en exploitation sont les plus nombreux. Le territoire européen forme un échantillon très large et représentatif pour les objectifs de l'étude. La proximité géographique avec la France facilite également les analyses comparatives dans le cadre de l'étude. Une base de données sur les PEM et leurs caractéristiques techniques (emprise, nombre et hauteurs des turbines, fondations, etc.) a été compilée en utilisant les données du site 4C Offshore (<https://www.4coffshore.com/>; données téléchargées le 29/06/2023), et d'autres paramètres environnementaux (profondeur, distance à la côte, substrat, vent, température, etc.) ont été calculés à partir d'autres sources. Les données collectées ont été regroupées en huit thématiques qui correspondent :

- 1) aux informations d'identification propres à chaque PEM,
- 2) aux informations relatives à la localisation géographique des PEM,
- 3) aux informations générales concernant chaque PEM,
- 4) à l'ensemble des dates clés concernant les PEM,
- 5) aux caractéristiques techniques,
- 6) aux caractéristiques environnementales,
- 7) aux conditions météorologiques et hydrologiques,
- 8) aux liens avec les zones protégées.

Les caractéristiques techniques et environnementales des PEM ont été analysées et discutées. Les données issues de la base de données 4C Offshore n'ont pas été vérifiées au cas par cas. Une difficulté rencontrée pour cette étude est le grand nombre de PEM en exploitation en Europe. Il a été décidé de faire une analyse des différents paramètres pays par pays mais cela peut engendrer un lissage des données, dissimulant des variabilités importantes au sein d'un même pays. Les graphiques de diagramme en boîte, présents dans le rapport et cette synthèse, permettent toutefois de visualiser l'ensemble du jeu de données au sein de chaque pays, et fournissent une indication de l'hétérogénéité du jeu de données.

A fin juin 2023, 125 PEM étaient en exploitation en Europe. Les PEM en exploitation ont été divisés en deux catégories : les parcs expérimentaux et les parcs commerciaux. Il a été choisi de différencier les fermes pilotes et les sites de tests de prototypes de turbines des parcs commerciaux car la régulation, les caractéristiques des éoliennes, les modalités de fonctionnement, les suivis et les effets peuvent être très différents des grands PEM. Cette différenciation n'a toutefois pas permis de se défaire de valeurs extrêmes (nombre de turbines faible, puissance unitaire faible, etc.) puisque celles-ci sont associées à l'ancienneté des PEM, plutôt qu'à leur catégorie. Sur les 125 parcs existants en Europe, 100 sont des parcs commerciaux. Ce sont ces parcs qui ont fait l'objet d'une analyse approfondie dans le rapport de phase 1. Ces parcs sont répartis dans neuf pays (Carte 1) et sont classés ci-après par nombre décroissant de PEM : le Royaume-Uni (nombre de parcs n=36), l'Allemagne (n=28), la Belgique (n=11), le Danemark (n=11), les Pays-Bas (n=7), la Suède (n=4), la Finlande (n=1), la France (n=1) et l'Italie (n=1).

L'un des objectifs de cette phase est d'identifier, parmi les PEM en exploitation, ceux dont le contexte technique et environnemental est le plus proche du contexte français, afin de conclure sur la possibilité de transposer les résultats et d'anticiper les potentiels impacts des PEM français. Bien que cette étude se concentre sur les PEM européens en exploitation, il est également pertinent de considérer les futurs PEM en France afin d'avoir une représentation plus complète du contexte français, et de mieux sélectionner les PEM étrangers pour les phases 2 et 3 de cette étude.



Carte 1 : Nombre de parcs éoliens en mer en exploitation commerciale par pays en Europe, à fin juin 2023.

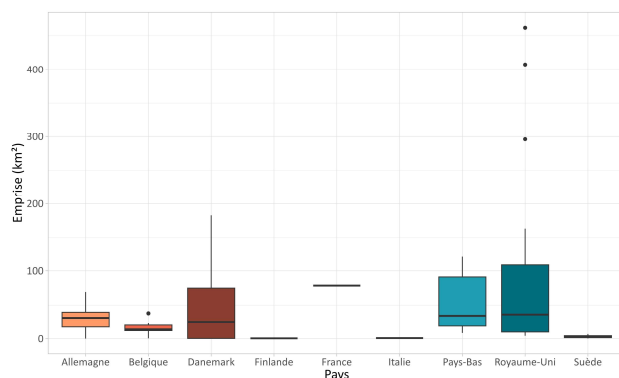


Figure 1 : Représentation statistique de l'emprise au sol des parcs éoliens en exploitation commerciale par pays, à fin juin 2023.

En France, 15 projets de PEM de nature commerciale sont en cours de développement. Pour la plupart de ces PEM, les caractéristiques techniques ne sont pas encore connues de manière exacte. L'analyse a ainsi été limitée aux PEM "en exploitation", "en construction" et "en pré construction" puisque les caractéristiques techniques de ces parcs sont connues. La sélection qui en résulte comprend six parcs : Dieppe - Le Tréport, Fécamp, Calvados, Saint-Brieuc, Saint-Nazaire et Yeu-Noirmoutier. Les caractéristiques environnementales des PEM actuels et futurs en France dépendent notamment de la localisation du projet donc ces caractéristiques ont pu être déterminées, non seulement pour les projets cités ci-dessus, mais également pour les projets au stade "études préliminaires" ou "zones de développement".

Les caractéristiques techniques

L'emprise au sol

L'**emprise au sol**, des PEM diffèrent selon les pays. Elle est en moyenne plus élevée au Royaume-Uni avec 79 km² par parc, suivie de la France avec 78,6 km² (n=1). L'emprise moyenne par parc est ensuite de 55 km² aux Pays-Bas, 48,1 km² au Danemark, 31 km² en Allemagne et 16,1 km² en Belgique. La Figure 1 permet d'avoir une représentation visuelle globale¹ de l'emprise au sol des parcs par pays. Les emprises des parcs du Royaume-Uni, des Pays-Bas et du Danemark sont très hétérogènes, et le Royaume-Uni présente plusieurs valeurs extrêmes avec un maximum à environ 462 km². Les emprises des parcs belges sont plutôt homogènes par rapport aux pays cités auparavant. En 2026 en France, l'emprise des 6 PEM en exploitation sera comprise entre 78 km² et 112 km² avec une moyenne à 95 km² (Figure 2). Trois des six PEM français qui seront en exploitation en 2026 auront des emprises comprises entre 81 et 108 km², ce qui est élevé par rapport à la situation actuelle en Europe.

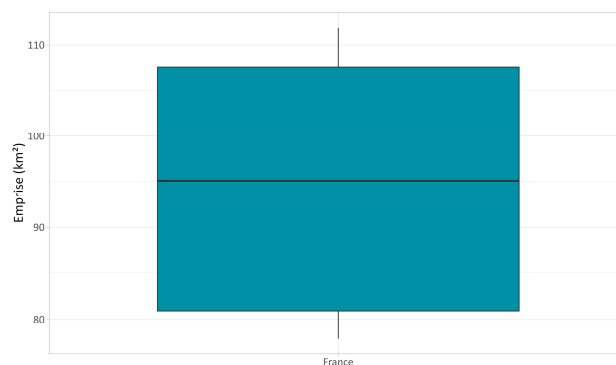


Figure 2 : Représentation statistique de l'emprise au sol des parcs éoliens en mer en France en exploitation commerciale à date ou qui le sera prochainement (2026).

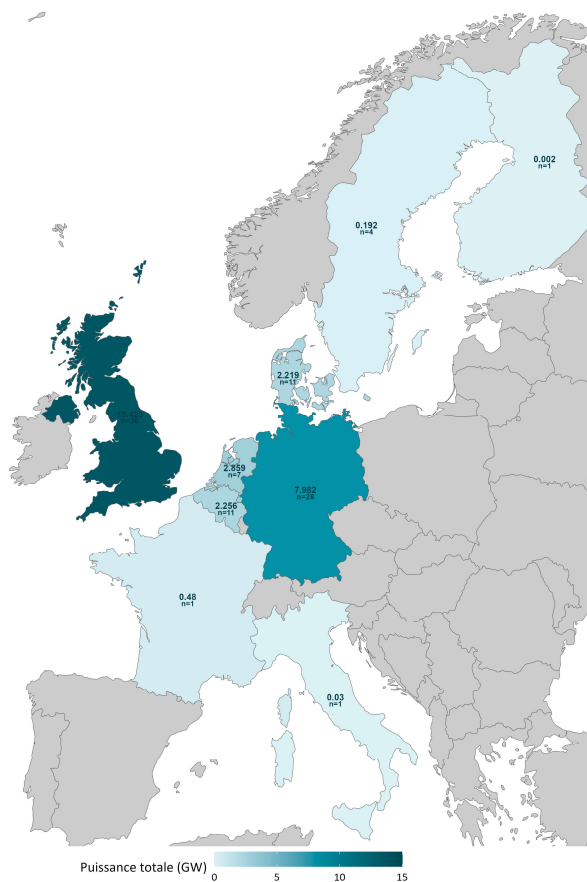
L'évolution temporelle de l'emprise moyenne des parcs installés en Europe montre une forte augmentation au fur et à mesure des années au Royaume-Uni et au Danemark. En effet, l'emprise moyenne au Royaume-Uni était de 6,9 km² en 2004 pour atteindre 302,4 km² en 2022. Au Danemark, l'emprise moyenne des parcs a augmenté de 0,3 km² en 1995 à 182,6 km² en 2021. En Allemagne, l'emprise moyenne a progressivement augmenté avec 0,1 km² en 2006 à 58,9 km² en 2013, mais depuis 2016, l'emprise moyenne des parcs diminue progressivement pour maintenant atteindre en 2023, 17,4 km². Les emprises initiales de certains pays peuvent sembler très petites aujourd'hui, mais il y a une vingtaine d'années, les PEM de taille commerciale pouvaient n'être composés que de quelques turbines dans une zone restreinte. Cela explique des valeurs d'emprise au sol très basses. Aux Pays-Bas et en Belgique, l'emprise moyenne par parc augmente globalement au cours du

¹ Ce type de figure est une représentation graphique de données statistiques, appelée « boîte à moustache » ou diagramme en boîte. Sur cette figure sont représentées : une boîte dont les limites correspondent au 25e percentile et au 75e percentile des données, la médiane des données (ligne horizontale noire), les valeurs minimales et maximales à l'extrémité des lignes verticales, et, certaines fois, des valeurs extrêmes du jeu de données (points). La médiane est la valeur qui sépare l'ensemble des données en deux parts égales alors que la moyenne est calculée comme la somme des valeurs des données divisées par le nombre de valeurs. La médiane est très utile quand les données sont réparties de façon inégale. Si la médiane est par exemple supérieure à la moyenne, les différences sont présentes dans les valeurs basses.

temps mais on constate une légère diminution pour les derniers parcs mis en service. En France, la surface moyenne des PEM prévus augmentera au fil des années.

La puissance

La **puissance cumulée** des PEM en exploitation par pays (Carte 2) est la plus élevée au Royaume-Uni avec 13,4 GW d'éolien en mer installé. L'Allemagne est le deuxième pays avec 8 GW. Trois autres pays possèdent une puissance totale installée entre 2 et 3 GW : les Pays-Bas avec 2,9 GW, la Belgique avec 2,3 GW et le Danemark avec 2,2 GW. La France, la Suède, la Finlande et l'Italie ont une puissance installée inférieure à 0,5 GW. La **puissance moyenne** par PEM a également été analysée. On constate ainsi que la plus élevée est en France avec 480 MW (n=1), suivi par les Pays-Bas avec 408 MW (n=7). Tandis qu'au Royaume-Uni, la puissance est de 373 MW en moyenne (n=36). La puissance moyenne est similaire au Danemark et en Belgique avec respectivement 202 MW et 205 MW par parc (n=11 dans chaque pays). Enfin, les valeurs moyennes sont faibles pour la Suède (48 MW, n=4), l'Italie (30 MW, n=1) et la Finlande (2 MW, n=1). Les Pays-Bas possèdent la gamme de puissances la plus étendue (Figure 3) : 50% des valeurs sont comprises entre 136 et 666 MW avec une médiane de 383 MW. Le Royaume-Uni possède également une large gamme de valeurs avec 50% des données comprises entre 97 MW et 574 MW. On note une valeur extrême sur la figure pour un parc installé de 1 386 MW. Des parcs de différentes puissances ont été installés au Danemark puisque 50% des valeurs sont comprises entre 22 et 305 MW avec une médiane à 166 MW. La distribution des valeurs est plus restreinte pour l'Allemagne : 50% des parcs ont des puissances comprises entre 202 et 388 MW avec une médiane à 292 MW. On constate que l'Allemagne possède le 25^{ème} quartile le plus élevé (environ 220 MW). Enfin, les parcs belges sont assez similaires en termes de puissance puisque 50% d'entre eux ont des valeurs comprises entre 165 MW à 244 MW. La France est pour l'instant présente dans les valeurs élevées (Figure 3) et cela devrait peu évoluer dans les années à venir (Figure 4). En effet, les puissances minimale et maximale seront de 450 et 498 MW, et seront donc relativement similaires entre les parcs (différence de 48 MW au maximum).



Carte 2 : Puissance totale installée (en GW) en éolien en mer par pays, à fin juin 2023.

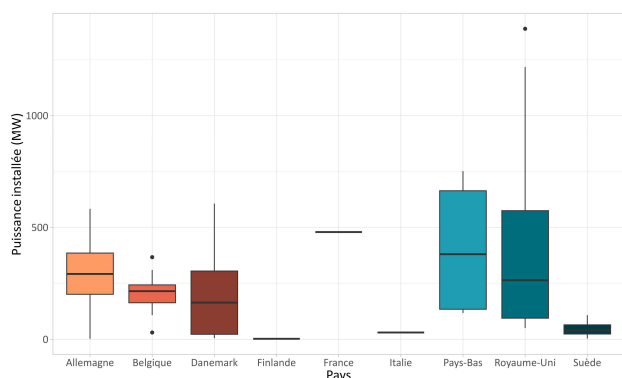


Figure 3 : Représentation statistique de la puissance installée (MW) des parcs éoliens en exploitation commerciale, par pays, à fin juin 2023.

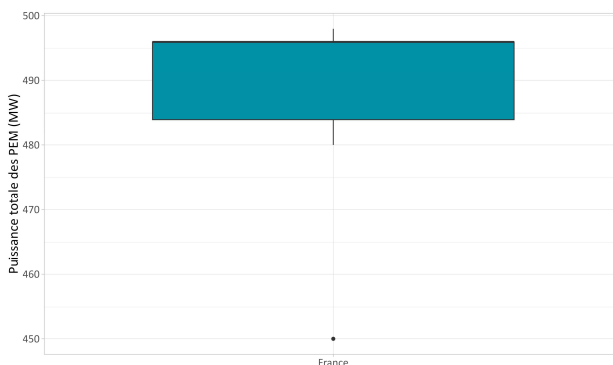


Figure 4 : Représentation statistique de la puissance des parcs éoliens en mer en France en exploitation commerciale à date ou qui le seront prochainement.

Le nombre de turbines

Le pays avec le plus grand **nombre de turbines** installées est le Royaume-Uni avec un total de 2 622 turbines. L'Allemagne dispose de 1 538 turbines, et les Pays-Bas et le Danemark ont un nombre similaire de turbines installées (respectivement 561 et 600). Si l'on regarde dans son ensemble le nombre de turbines présentes par parc dans chaque pays (Figure 5), le Danemark possède un nombre de turbines très hétérogène par parc puisque 50% ont entre 10 et 85 turbines et la médiane est de 72 turbines. Le Royaume-Uni possède également un nombre de turbines hétérogène suivant les parcs installés : 50% des parcs possèdent entre 30 et 100 turbines, la médiane est de 62,5 turbines et le maximum est de 175 turbines. Les PEM aux Pays-Bas possèdent un nombre de turbines par parc assez élevé : la médiane est de 72 turbines et 50% des parcs ont entre 54 et 91,5 turbines (le 25^{ème} percentile est élevé). La Belgique possède un nombre de turbines plutôt homogène au sein de ses parcs : 50% ont entre 25 et 47 turbines. En Allemagne, la moitié des PEM ont un nombre de turbines compris entre 31,8 et 80. On constate également que le nombre moyen de turbines par parc est en augmentation dans tous les pays.

En comparaison, le seul PEM en exploitation France possède 80 turbines. Concernant les autres PEM français qui seront en exploitation en 2026, le nombre minimal de turbines sera de 62 et le nombre maximal de 71 turbines. La moitié des PEM français qui seront en exploitation en 2026 auront un nombre de turbines compris entre 63 et 69 (Figure 6).

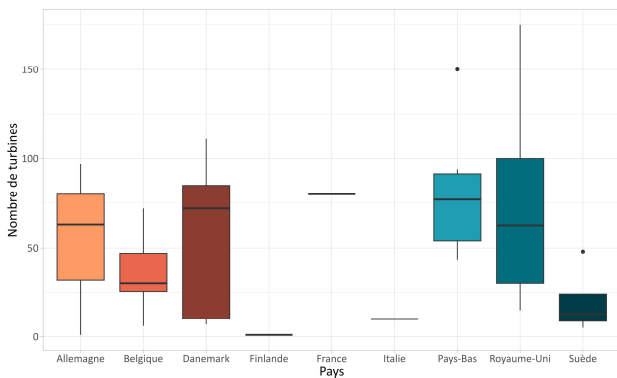


Figure 5 : Représentation statistique du nombre de turbines des parcs éoliens en exploitation commerciale par pays, à fin juin 2023.

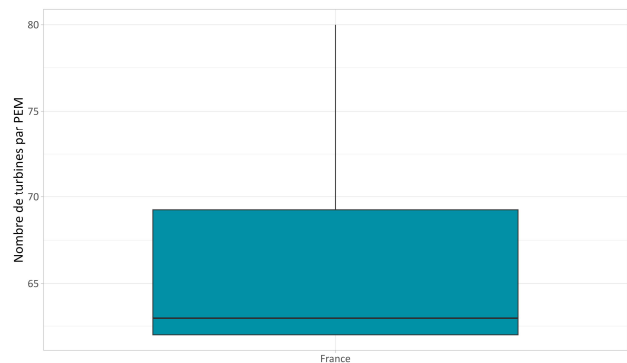


Figure 6 : Représentation statistique du nombre de turbines des parcs éoliens en mer en France en exploitation commerciale à date ou qui le seront prochainement.

La hauteur des turbines

Trois paramètres concernant les turbines ont été analysés : la hauteur totale, le diamètre du rotor et la hauteur en bas de pale. Les turbines les plus hautes, de 204 m, se trouvent au Royaume-Uni. La gamme des valeurs des **hauteurs totales des turbines** est similaire dans quatre pays : la moitié des hauteurs est semblable en Allemagne (148 à 180 m), en Belgique (146 à 185 m), aux Pays-Bas (143 à 182 m) et au Royaume-Uni (133 à 183 m). La médiane de ces trois premiers pays se trouve entre 154 et 158 m. La médiane est plus basse au Royaume-Uni (140 m). Enfin, le Danemark et la Suède possèdent des hauteurs totales de turbines plus faibles : 50% sont comprises entre 110 et 141 m pour le Danemark, et entre 102 et 137 m pour la Suède. Les médianes sont de 125 m pour la Suède et de 115 m pour le Danemark, cela est probablement dû à l'ancienneté de nombreux parcs. En France, les turbines installées ont une hauteur totale de 184 mètres. Pour les PEM qui seront achevés en 2026, les plus hautes turbines atteindront 211 mètres. La moyenne globale de la hauteur totale des turbines à l'échelle des 6 PEM qui seront en exploitation en 2026 est de 194 m.

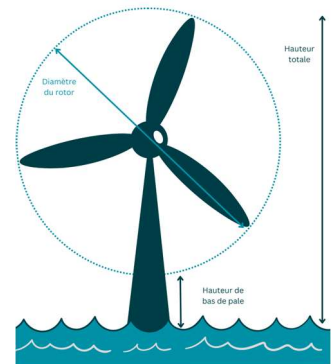


Figure 7 : Schéma d'une turbine et des caractéristiques analysées (© Biotope).

Le diamètre du rotor

Le **diamètre du rotor** des turbines est corrélé à leur hauteur, de sorte que les mêmes tendances sont observées. La taille maximale du diamètre du rotor est retrouvée au Royaume-Uni avec 172 m. L'Allemagne, la Belgique, les Pays-Bas et le Royaume-Uni ont des turbines avec des diamètres de rotor importants. Les valeurs sont plus faibles pour le Danemark et la Suède. Le diamètre du rotor des turbines du PEM français est de 150 m. Pour les cinq autres PEM prévus d'être achevés entre 2023 et 2026 : deux auront un diamètre du rotor de 154 m, et trois un diamètre de 167 m. La hauteur des turbines moyennée par année est représentée par pays, ainsi que le diamètre du rotor sur la Figure 8. Le premier constat est que l'évolution des deux paramètres est identique : la hauteur totale et le diamètre du rotor sont corrélés. Ils sont en augmentation dans chaque pays depuis le premier PEM mis en service et cela sera également le cas dans les années à venir en France.

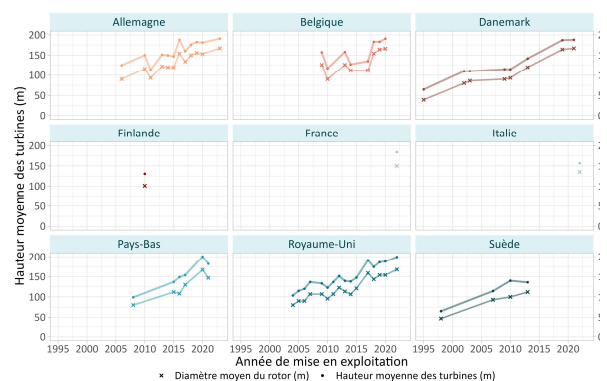


Figure 8 : Évolution temporelle de la hauteur moyenne des turbines (•) et du diamètre moyen des rotors (x), par année et par pays, à fin juin 2023.

La hauteur en bas de pale

La **hauteur en bas de pale** (également appelée airgap) diffère entre les pays avec un minimum de 15 m en Belgique et un maximum de 44 m aux Pays-Bas (Figure 9). Les Pays-Bas sont le pays qui possède des hauteurs de bas de pale les plus variées. En effet, 50% des hauteurs sont comprises entre 24,5 m et 37 m, avec une médiane à 26 m et une moyenne à 30,3 m. La France et l'Italie se situent pour l'instant dans la fourchette haute des hauteurs en bas de pale (34 et 32,5 m respectivement). La moitié des parcs allemands ont des hauteurs en bas de pale comprises entre 25,75 et 30 m. Les hauteurs en bas de pale sont plutôt basses au Danemark puisque la médiane est de 23 m, la moyenne de 24,2 m, et la moitié des parcs ont des hauteurs en bas de pale comprises entre 21,6 et 25,5 m. Les caractéristiques des turbines des 6 premiers projets en France se situeront dans la fourchette haute des valeurs trouvées dans les PEM en exploitation en Europe à date. La médiane de l'airgap en France sera en effet de 35 m en 2026 (Figure 10) alors que celles-ci sont pour l'instant de 23 à 28 m dans les cinq pays comportant le plus de PEM en exploitation. L'évolution temporelle de la hauteur moyenne en bas de pale par année et par pays est intéressante. Au fil des années, la hauteur moyenne diminue graduellement dans trois pays : l'Allemagne, la Belgique et le Danemark. En Allemagne, la hauteur en bas de pale est passée de 35 m en 2006 à 24 m en

2023. En Belgique, celle-ci a diminué de 31 m à 24,7 m entre 2009 et 2022. Enfin, au Danemark, la hauteur en bas de pale est passée de 25,5 m depuis 1995 à 21 m en 2021. Au Royaume-Uni et en Suède, la hauteur en bas de pale semble légèrement augmenter avec le temps. Au Royaume-Uni, elle était de 23,5 m en 2004 puis 27,1 m en 2022. Aux Pays-Bas, la hauteur a fortement augmenté depuis les premiers parcs mis en service passant de 19 m en 2008 à 35 m en 2021.

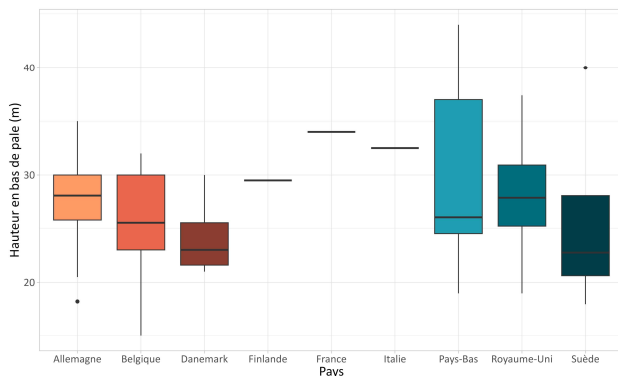


Figure 9 : Représentation statistique de la hauteur en bas de pale des parcs éoliens en exploitation commerciale par pays, à fin juin 2023.

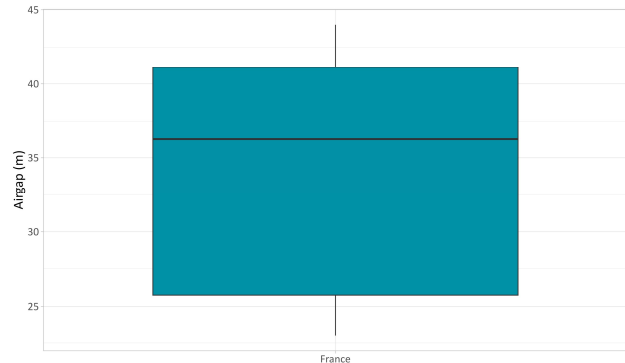


Figure 10 : Représentation statistique de l'airgap des parcs éoliens en mer en France en exploitation commerciale à date ou qui le seront prochainement.

Les fondations

Une analyse des **fondations** des PEM a tout d'abord été réalisée à l'échelle de l'Europe, puis par pays. En Europe, les PEM de type commercial sont tous des PEM avec des fondations posées (ou dits fixes). Parmi les fondations posées (Figure 11), ce sont les fondations de types monopieux qui sont les plus utilisées, constituant 74% du type de fondations des PEM en exploitation. Les fondations gravitaires sont présentes dans 9% des PEM en Europe et les fondations jacket dans 8%. Les autres types de fondations sont peu représentés pour le moment : il y a 2% de PEM avec des fondations tripodes, et 1% avec des fondations tripieux, des fondations de pieux surélevés ou des fondations avec des anneaux de béton ancrés dans la roche. Enfin, 4% des PEM ont des fondations de différents types en leur sein. A l'échelle des pays, 100% des PEM en exploitation aux Pays-Bas sont constitués de fondations monopieu. Le plus grand nombre de parcs avec des fondations gravitaires se trouvent au Danemark (n=4), bien que les fondations monopieu restent majoritaires dans ce pays. En Belgique, en Allemagne et au Royaume-Uni, les fondations monopieu sont les principales utilisées.

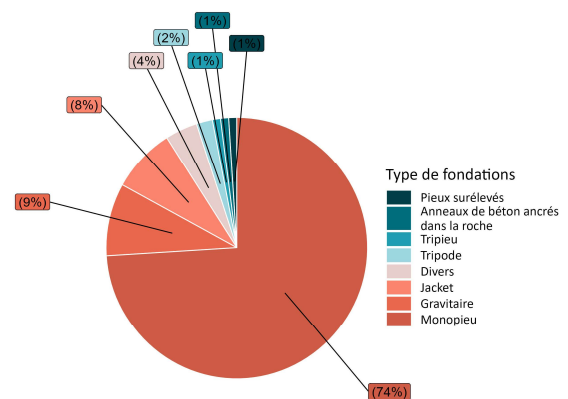


Figure 11 : Type de fondations des parcs éoliens en mer en exploitation commerciale en Europe, à fin juin 2023.

Concernant le **moyen d'installation des fondations**, les fondations de type jacket, tripieu, tripode ont toutes été enfoncées à l'aide d'un marteau hydraulique. Les fondations monopieu ont majoritairement (n=69) été installées avec la même technique, sauf dans un parc en Allemagne qui a utilisé du vibrofonçage et un autre parc aux Pays-Bas où une technique hybride avec du vibrofonçage et une technique de levage ont été utilisées. Les six PEM français qui seront en exploitation commerciale en 2026 seront tous constitués de turbines posées sur le fond marin. Trois parcs auront des fondations de type monopieu, deux parcs seront constitués de fondations jacket et enfin, le PEM de Fécamp est constitué de fondations gravitaires.

Les caractéristiques environnementales

Un certain nombre de **caractéristiques environnementales** ont été analysées pour les PEM européens en exploitation commerciale. Pour rappel, ces caractéristiques ont pu être analysées en comparaison pour 16 projets en France. Trois projets sont localisés en mer Méditerranée, sept projets sont localisés sur la façade Manche/Mer du Nord et six autres sur la façade Atlantique (dont un PEM déjà en exploitation).

La profondeur

La profondeur est l'une des contraintes les plus fortes pour le développement de l'éolien en mer. L'analyse de la **profondeur minimale** au sein de l'emprise des PEM montre que plusieurs sont situés à très faible profondeur : 0 m en Allemagne, au Danemark et au Royaume-Uni (Figure 12). Ces PEM se trouvent probablement sur des bancs de sable qui se découvrent à marée basse. On trouve la profondeur minimale la plus élevée en Allemagne (40 m de profondeur). Les PEM en Suède et au Danemark sont installés à des bathymétries plus faibles que les autres pays : la moitié des PEM en Suède sont localisés à des profondeurs minimales entre 3,25 et 7,5 m (moyenne = 5,3 m) et ceux au Danemark entre 4,5 et 10 m (moyenne = 7,6 m). Les deux parcs en Italie et en Finlande se trouvent également à faible profondeur. Au Royaume-Uni et aux Pays-Bas, les profondeurs minimales des PEM sont intermédiaires avec respectivement la moitié d'entre eux présents entre 6,5 et 18 m (moyenne = 13,6 m) et entre 11 et 20 m (moyenne = 15,7 m). Les PEM en Allemagne et en Belgique ont été construits à des bathymétries plus élevées : la moitié se trouvent entre 20,8 et 30,5 m de profondeur en Allemagne (moyenne = 25,5 m) et entre 16,5 et 27 m de profondeur en Belgique (moyenne = 20,8 m). Comme le montre la Figure 13, les **profondeurs minimales et maximales** au sein des emprises des PEM actuels et futurs en France sont disparates : 50 % des profondeurs

minimales se situent approximativement entre 20 m et 70 m, et 50% des profondeurs maximales se répartissent entre 33 m et environ 95 m. En moyenne, la profondeur minimale sera de 43,5 m et la profondeur maximale de 62,8 m. Les profondeurs d'installation des PEM augmentent au cours du temps dans la plupart des pays européens. C'est le cas pour le Royaume-Uni, la Belgique, le Danemark et la Suède. C'était le cas en Allemagne jusqu'en 2020 mais les derniers parcs ont été construits à des bathymétries moins profondes. Aux Pays-Bas, la tendance est moins nette, les derniers parcs sont installés à des profondeurs plus faibles que les premiers parcs construits. En France, de 2022 à 2028, les profondeurs moyennes sont relativement stables, la profondeur maximale ne dépasse pas 50 m et les profondeurs minimales restent comprises entre 4 et 32 m. De 2030 à 2032, les profondeurs minimales et maximales moyennes seront nettement plus élevées. Sur ces trois années, les profondeurs maximales moyennes seront respectivement de 93 m, 50 m et 86,5 m. Ces profondeurs plus importantes s'expliquent principalement par l'implantation des trois parcs flottants : Méditerranée I et II et Sud de la Bretagne 1. En effet, ces parcs pourront atteindre des profondeurs plus élevées que les éoliennes posées grâce à leurs fondations flottantes.

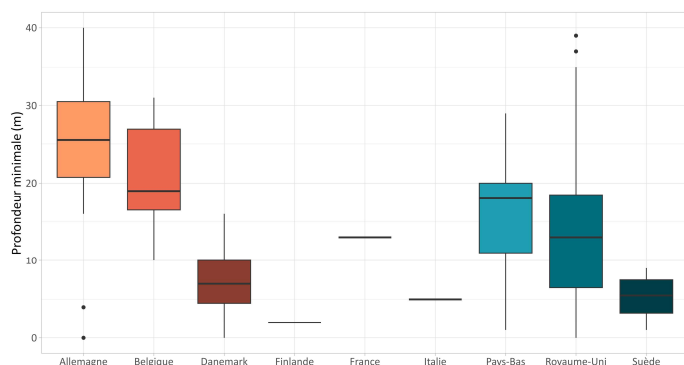


Figure 12 : Représentation statistique de la profondeur minimale des parcs éoliens en exploitation commerciale par pays, à fin juin 2023.

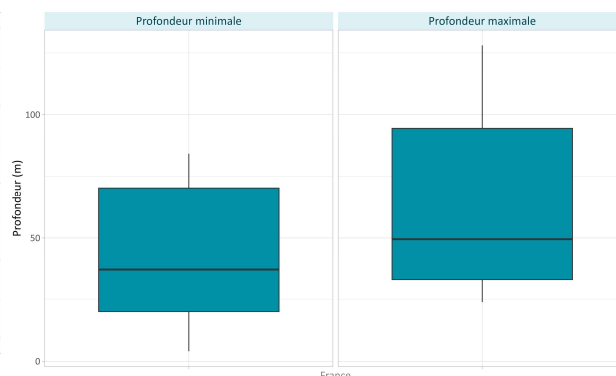


Figure 13 : Représentation statistique de la profondeur minimale et maximale des parcs éoliens en mer en France en exploitation commerciale à date ou future.

La distance à la côte

La **distance à la côte** à laquelle les PEM ont été installés a également été analysée. La distance minimale à la côte des PEM en Europe est, en moyenne, comprise entre 9,8 et 46,3 km. La distance minimale la plus faible est retrouvée en Italie et aux Pays-Bas avec 0,2 km de distance (Figure 14). La distance minimale la plus élevée est en Belgique, avec le parc le plus proche situé à 19,8 km des côtes. Les PEM en exploitation en Belgique, aux Pays-Bas et en Allemagne sont les plus éloignés des côtes. La moitié des parcs sont à une distance minimale à la côte comprise entre 25,3 et 40 km pour la Belgique, entre 22,8 et 32 km pour les Pays-Bas et entre 32,3 et 70,6 km pour l'Allemagne. Les PEM en exploitation au Danemark sont peu éloignés des côtes puisque plus de la moitié sont à une distance minimale inférieure à 15 km du littoral. Au Royaume-Uni, la moitié des PEM sont à une distance minimale de la côte comprise entre 7 et 21 km. Toutefois, certains parcs sont très éloignés puisqu'un parc est distant de 102,4 km des côtes. En France, la distance minimale la plus faible des 16 projets analysés est de 9,7 km et la plus élevée est de 47,5 km pour le projet Sud-Atlantique II. La distance minimale moyenne est de 21,6 km. 50 % des valeurs de la distance minimale à la côte se situent entre 11,6 km et 25,9 km.

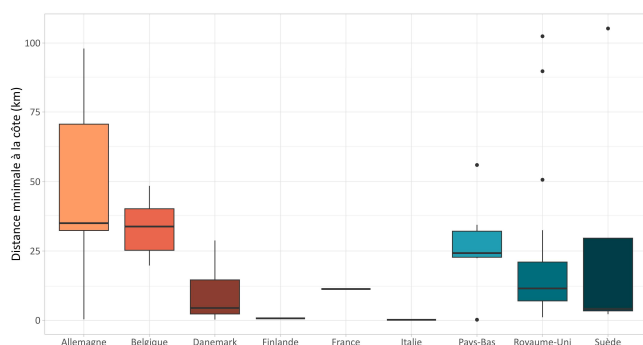


Figure 14 : Représentation statistique de la distance minimale à la côte des parcs éoliens en exploitation commerciale, par pays, à fin juin 2023.

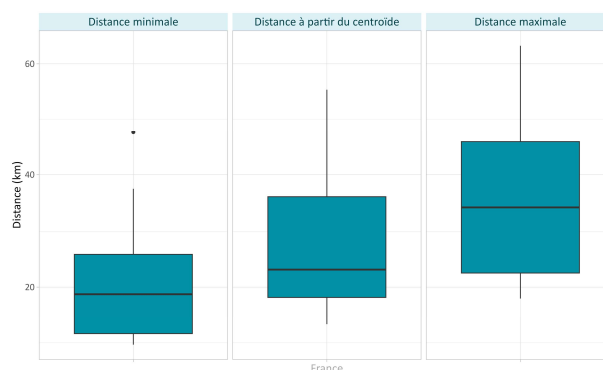


Figure 15 : Représentation statistique de la distance à la côte minimale, maximale et à partir du centroïde des parcs éoliens en mer en France en exploitation commerciale à date ou future.

L'évolution temporelle de la distance des PEM à la côte semble augmenter avec le temps en Allemagne, en Belgique, au Danemark et au Royaume-Uni. Seuls les PEM aux Pays-Bas et en Suède ne suivent pas une tendance claire. En France, à partir de 2028, les distances à la côte augmenteront considérablement pour atteindre en 2031 et 2032 des distances nettement plus élevées que les années précédentes (trois parcs flottants seront installés).

Le substrat

Le **substrat marin** à l'intérieur de l'emprise des PEM a été analysé à partir de données issues du site European Marine Observation and Data Network (EMODnet). Il a été choisi d'utiliser ces données car elles sont disponibles à l'échelle de l'Europe. Bien qu'il existe des données plus précises pour certains pays ou PEM, il a été choisi d'utiliser des données comparables et au même maillage pour tous les PEM. S'agissant d'une analyse macroscopique, seuls les grands types de

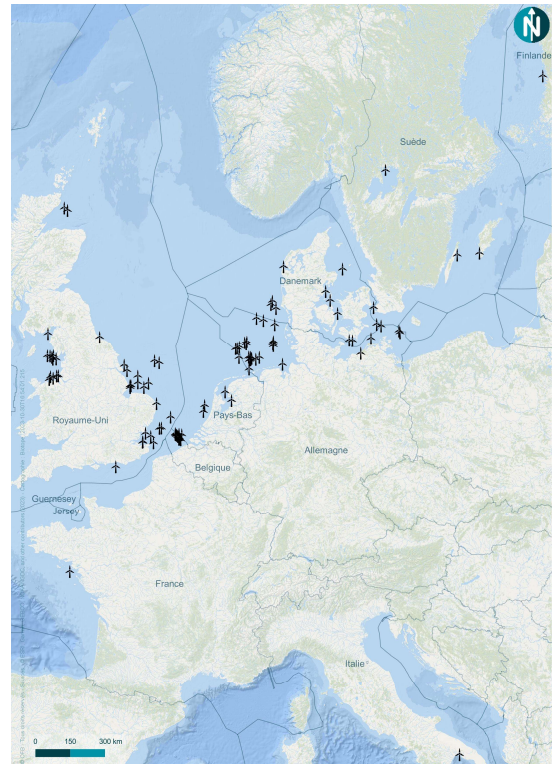
substrats sont considérés. Le type de substrat principal des PEM en exploitation en Europe est le sable, il constitue 92% de la surface des PEM en exploitation en Belgique, 89% aux Pays-Bas, 83% en Allemagne et 67 % au Danemark. Le deuxième substrat majoritaire au Danemark est de type sédiments mixtes. Au Royaume-Uni, le sable est également le type de substrat majoritaire, mais il représente moins de la moitié de la surface cumulée des PEM (48%). Les sédiments à gros grains représentent ensuite 38% de la surface de ces PEM. La situation est différente en France puisque le substrat de type sédiment à gros grains est le substrat le plus représenté avec 45% de la surface cumulée à l'échelle des 16 projets prévus en 2032, suivi de près à 40% par le substrat de type boue à sable boueux. A première vue, il pourrait être compliqué de faire des comparaisons entre les PEM en Europe et en France mais en analysant le substrat primaire de chaque PEM plus en détail, on constate par exemple qu'au Royaume-Uni, 15 PEM ont un substrat primaire de type sédiments à gros grains et 7 autres de type boue à sable boueux.

Les conditions météorologiques et hydrologiques

Les **conditions météorologiques et hydrologiques** au centroïde de chaque PEM ont été analysées à différentes échelles temporelles (mensuelle, saisonnière, annuelle) et spatiales (PEM, pays, océan, Europe).

Le vent

La **vitesse et la direction du vent** ont été analysées en s'appuyant sur des données mensuelles à 10 m d'altitude de 2012 à 2022 par le programme Copernicus. Une valeur moyenne a été récupérée par mois, par saison et par année au centroïde de chaque PEM. La Figure 16 montre la distribution des valeurs de vitesses de vent annuelles. Il en ressort clairement que ces valeurs, au sein d'un même pays, peuvent varier considérablement en fonction de la diversité géographique des emplacements des PEM (Carte 3). En Belgique, tous les PEM sont construits très près les uns des autres, ce qui fait que la variation est très faible et que presque tous les PEM ont une vitesse de vent de 3,4 km/h. Le Danemark et le Royaume-Uni ont des variations de vitesse du vent beaucoup plus importantes au sein de leur territoire (moyenne de 3,3 et 3 km/h), notamment en raison du fait que les PEM de ces pays sont répartis sur plusieurs mers. La plus grande variation de la vitesse du vent est observée en Suède, qui a également de grandes distances entre ses parcs et a également construit un de ses PEM sur un lac. L'Allemagne est en tête des pays européens avec une vitesse de vent moyenne la plus élevée (3,6 km/h). Les vitesses de vent les plus faibles sont de loin celles de l'Italie (moyenne = 1,3 km/h), mais cette valeur ne concerne qu'un seul parc, situé très près de la côte. En France, les résultats sont présentés pour les façades Manche/Mer du Nord, Atlantique et Méditerranée en tenant compte des 16 projets actuels ou futurs (Figure 17). Les projets de Méditerranée possèdent une vitesse de vent moyenne de 3,3 m/s, plus élevée que les projets en Atlantique (moyenne = 3,1 m/s) et en Manche/Mer du Nord (moyenne = 2,9 m/s). Les données des PEM français varient nettement plus sur la façade Manche/Mer du Nord que sur les deux autres façades.



Carte 3 : Localisation des parcs éoliens en mer en exploitation commerciale en Europe à fin juin 2023. Chaque éolienne est positionnée au centroïde d'un parc.

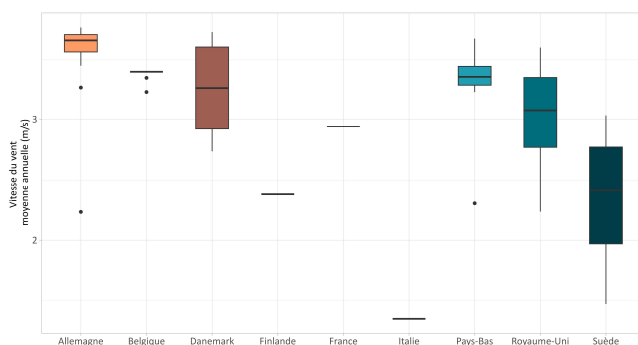


Figure 16 : Représentation statistique des vitesses annuelles de vent des parcs éoliens en mer en exploitation commerciale, présentée par pays.

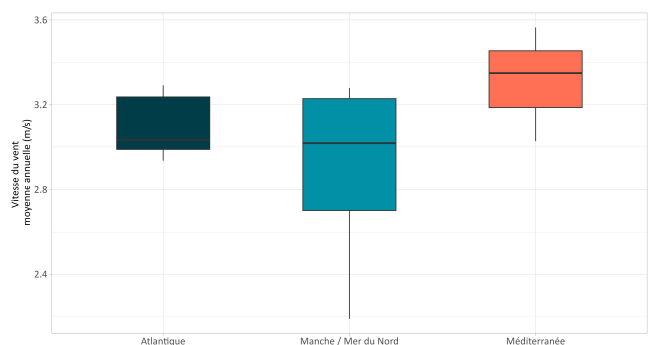


Figure 17 : Représentation statistique des vitesses annuelles de vent des parcs éoliens en mer en France en exploitation commerciale à date ou future, présentée par façade.

L'évolution de la vitesse moyenne du vent au cours de l'année montre une variation saisonnière similaire dans presque tous les pays. La vitesse du vent est généralement plus faible pendant les périodes printanières et estivales, d'avril à septembre, et augmente en automne/hiver, d'octobre à février. Les vitesses de vent maximales sont généralement observées entre décembre et février. Les tendances sont similaires au cours de l'année pour les façades maritimes en France.

Les analyses qui viennent d'être présentées ont été effectuées à l'échelle des pays et comme le montre la Figure 16, de nombreuses variations présentes sont liées aux zones géographiques où sont localisés les PEM. Les analyses des vitesses

de vent moyennes par océan ou par mer montrent qu'en mer du Nord les vitesses sont très variables du fait de sa très grande superficie, en effet elle s'étend du Royaume-Uni à la Scandinavie (Norvège et Danemark). Les PEM du Lac de Vänern et de la mer Méditerranée présentent les vitesses de vent moyennes les plus faibles (attention : un seul PEM présent en mer Méditerranée, cela n'est pas nécessairement représentatif de cette mer). Pour les PEM situés dans l'océan Atlantique, les vitesses de vent moyennes annuelles sont de l'ordre de 3 m/s. Des roses des vents ont également été créées en prenant en compte les conditions de vent (intensité et direction vers lequel il souffle) de l'ensemble des parcs étudiés. Ces roses des vents permettent de représenter la vitesse du vent en fonction de la direction et du pourcentage d'occurrence. La direction principale depuis laquelle le vent souffle pour l'ensemble des PEM en exploitation est est-nord-est. La vitesse du vent est principalement comprise entre 0 et 7 m/s, avec des valeurs plus rares jusqu'à 10 m/s.

La houle

La **hauteur et l'origine de la houle** ont également été analysées. L'analyse s'est appuyée sur des données moyennes et maximales journalières récupérées entre 2011 et 2021 par le programme Copernicus. En moyenne, la hauteur de la houle est plus élevée en France (1,4 m) et en Allemagne (1,3 m) (Figure 18). La hauteur de la houle moyenne est de 1 m en Belgique et aux Pays-Bas. La répartition des valeurs est très différente entre les pays et au sein de chaque pays. La distribution est très large au Danemark avec la moitié des parcs possédant des hauteurs moyennes de houle comprises entre 0,4 et 1,2 m. L'opposé est observé en Belgique puisque la moitié des parcs ont des hauteurs moyennes de houle comprises entre 1 et 1,05 m. Les PEM en Allemagne ont les hauteurs moyennes de houle les plus élevées (la moitié des PEM ont des hauteurs de houle supérieures à 1,2 m) mais des valeurs extrêmes sont observées en bas de l'échelle signifiant probablement que la situation géographique des PEM est très différente au sein de ce pays. En France (Figure 19), la hauteur moyenne de houle des projets en Atlantique est de 1,8 m, ce qui est nettement supérieur à la moyenne des projets en Manche/Mer du Nord (moyenne = 0,9 m) ou des projets en Méditerranée (moyenne = 0,9 m). L'évolution temporelle de la hauteur moyenne de la houle montre une tendance similaire entre les différents pays, avec des hauteurs de houle plus élevées d'octobre à février et faibles de mai à août. Les hauteurs de houle les plus élevées (> 2 m) sont observées en hiver en France et les plus faibles sont globalement présentes en Italie (PEM très proche de la côte). La rose de houle annuelle montre que pour l'ensemble des PEM en exploitation commerciale en Europe, l'origine de la houle provient principalement du sud-sud-ouest jusqu'au nord-nord-ouest. Les hauteurs de houles prévalentes sont celles en dessous de 1,5 m. En France, la rose de houle de l'Atlantique est similaire à celle de Manche/Mer du Nord en termes de direction. Une grande partie de la houle vient proportionnellement de l'ouest et de l'ouest-nord-ouest. En revanche, en Méditerranée, la houle semble provenir de différentes directions, la majorité venant proportionnellement de l'ouest-nord-ouest et du nord-ouest, tandis qu'une partie proportionnellement plus petite mais non négligeable semble provenir du sud-sud-est et du sud-est.

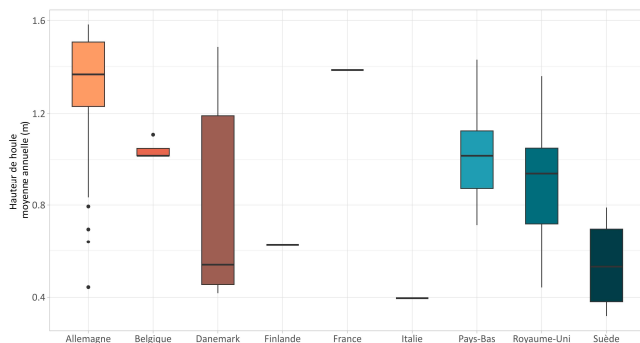


Figure 18 : Représentation statistique de la hauteur de la houle des parcs éoliens en mer en Europe en exploitation commerciale, présentée par pays.

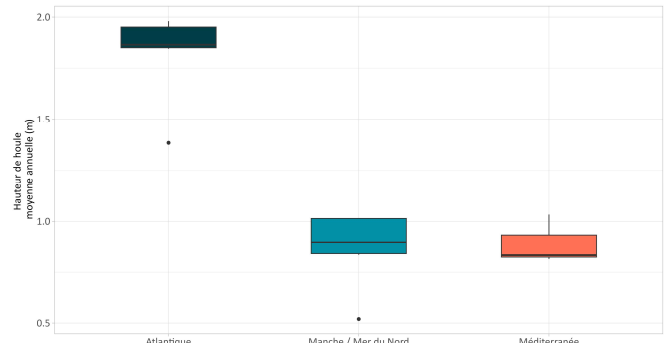


Figure 19 : Représentation statistique de la hauteur de la houle des parcs éoliens en mer en France en exploitation commerciale à date ou future, présentée par façade.

La température

La **température de la surface de l'eau** a aussi été analysée. L'analyse s'est appuyée sur des données journalières récupérées entre 2012 et 2022 par le programme Copernicus. La température annuelle minimale se trouve au sein d'un PEM en Finlande avec 7,6°C. La température annuelle maximale se trouve au sein du PEM en Italie avec 19,6°C. Les moyennes annuelles sont plus élevées (> 14°C) en France et en Italie, et sont les plus faibles (< 10°C) en Finlande et en Suède. Les températures sont assez similaires au sein des PEM de chaque pays (Figure 20). Pour les 16 projets analysés en France (Figure 21), la température moyenne des PEM en Méditerranée est beaucoup plus élevée (environ 17°C) que pour ceux présents sur les façades Atlantique (moyenne = 13,9°C) et Manche/Mer du Nord (moyenne = 12,7°C). Une forte disparité des valeurs est observée pour les futurs PEM en Atlantique : 50% des valeurs des températures moyennes annuelles se situent entre 14,4 et 15,4°C. Tandis que pour la façade Manche/Mer du Nord, 50% des valeurs varient entre 13,0 et 13,2°C. En Méditerranée, 50% des valeurs se situent entre 17,0 et 17,2°C. Les courbes d'évolution temporelle de la température au cours de l'année sont similaires en termes de tendance entre les différents pays. Sans surprise, les températures sont plus élevées en moyenne en mer Méditerranée (valeurs très différentes du reste du jeu de données) et dans l'océan Atlantique. Les valeurs moyennes des températures en mer du Nord se situent principalement entre 10 et 13°C, celles de la mer Baltique entre 10 et 11°C et de la mer d'Irlande entre 11 et 12°C.

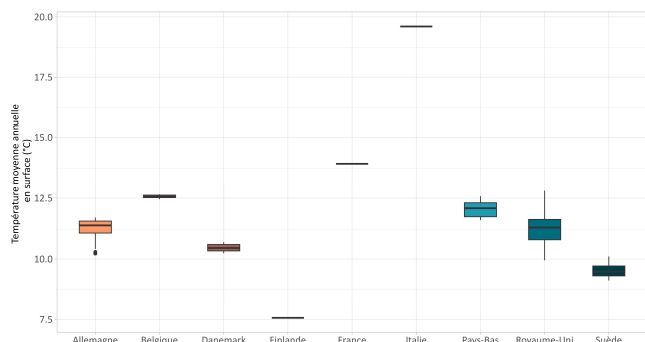


Figure 20 : Représentation statistique de la température de la surface de la mer des parcs éoliens en mer en Europe en exploitation commerciale, présentée par pays.

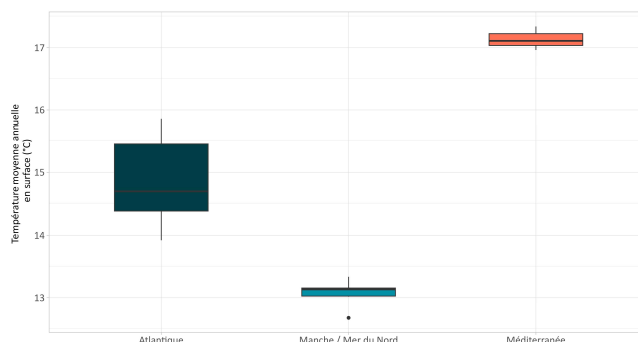


Figure 21 : Représentation statistique de la température de la surface de la mer des parcs éoliens en mer en France à date ou future, présentée par façade.

La distance aux sites protégés

Une analyse des **distances des PEM au site Natura 2000 le plus proche** et à d'autres types de zones marines protégées a été réalisée. Les résultats ci-après ne concernent que la distance au site Natura 2000 le plus proche. Pour le Royaume-Uni, les sites Natura 2000 datant de l'avant Brexit ont été utilisés. La distance minimale au site Natura 2000 le plus proche est de 0 km pour plusieurs PEM de différents pays (Allemagne, Danemark, Pays-Bas, Suède, Royaume-Uni), signifiant que ces PEM sont situés, en partie ou entièrement, à l'intérieur d'un site Natura 2000 (Figure 22). La distance minimale la plus élevée est retrouvée en Belgique où le PEM le plus proche d'un site Natura 2000 y est distant de 4,2 km. La variabilité des distances est élevée en Allemagne, en Belgique et au Royaume-Uni. La distance des 16 PEM actuels ou futurs en France au site Natura 2000 le plus proche est en moyenne de 5,9 km et varie de 0 km à 26,7 km au maximum (Figure 23). La distance des PEM aux différents types de sites Natura 2000 a été représentée en 9 classes de distance (Figure 24). La première constatation est que de nombreux PEM sont situés à l'intérieur de sites Natura 2000 : deux parcs sont situés dans une ZPS aux Pays-Bas, deux parcs sont situés dans une SIC/ZSC au Danemark, un parc en Allemagne et un en Suède sont situés dans une ZPS/ZSC. Mais c'est surtout au Royaume-Uni que le plus grand nombre de parcs est situé à l'intérieur de sites Natura 2000 (six dans une ZPS, sept dans une SIC/ZSC, soit 42% des parcs du pays), et un plus grand nombre de PEM est situé à proximité de sites Natura 2000 (83% à moins de 5 km de sites), contrairement à la Belgique où un plus grand nombre se situe loin des sites Natura 2000 (82% à plus de 10 km de sites). En Allemagne, 61% des PEM sont situés à moins de 5 km de sites Natura 2000 et 55% pour le Danemark. En France, aucune répartition particulière des distances aux différents types de sites n'est observée (Figure 25). Les ZPS les plus proches sont à moins de 5 km des PEM. Sur les huit PEM présents au sein de sites Natura 2000, deux sont des sites ZPS, quatre des sites SIC/ZSC et deux de tous types.

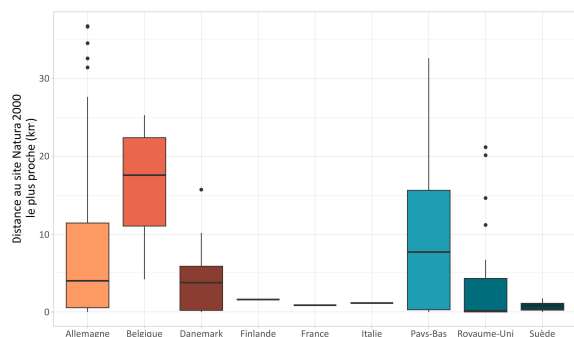


Figure 22 : Représentation statistique de la distance minimale au site Natura 2000 le plus proche des parcs éoliens en mer en exploitation commerciale, ou à leur équivalent au Royaume-Uni, à fin juin 2023.

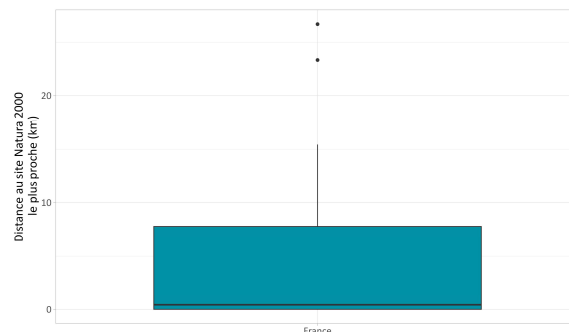


Figure 23 : Représentation statistique de la distance au site Natura 2000 le plus proche des parcs éoliens en mer en France en exploitation commerciale à date ou future.

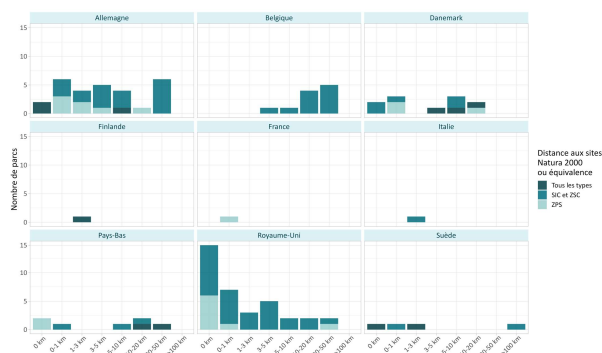


Figure 24 : Distance minimale des parcs éoliens en mer en exploitation commerciale aux différents types de sites Natura 2000 ou à leur équivalence pour le Royaume-Uni, à fin juin 2023.

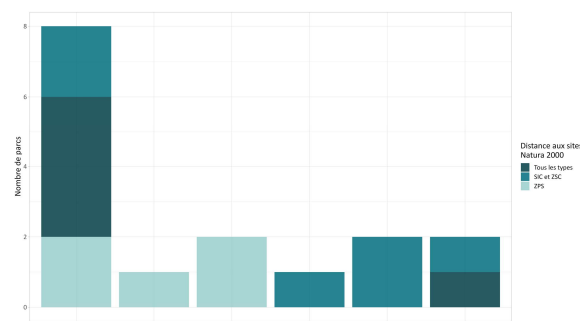


Figure 25 : Distance minimale des parcs éoliens en mer en France en exploitation commerciale à date ou future, aux différents types de sites Natura 2000.

Les durées des phases

Les **durées des différentes phases** des PEM en exploitation commerciale en Europe ont été analysées. L'analyse de la **durée moyenne entre l'étude d'impact et l'obtention de l'autorisation** montre qu'il y a des différences importantes entre les pays. Des pays comme l'Allemagne (moyenne = 3,6 ans) ou les Pays-Bas (moyenne = 3,0 ans) prennent en moyenne plus de temps pour obtenir une autorisation que le Danemark (moyenne = 1,1 an), le Royaume-Uni (moyenne = 1,5 an) ou la France (moyenne = 2 ans). La Belgique semble être le pays où le processus est le plus court, avec une moyenne d'un an. Les durées entre l'étude d'impact et l'autorisation sont plus disparates en Allemagne, dépendamment des projets. Pour la Belgique, le Danemark, les Pays-Bas et le Royaume-Uni, la moitié des parcs ont obtenue des autorisations en moins de 2 ans. La **durée entre l'obtention de l'autorisation et le début de la construction** peut également varier considérablement d'un pays à l'autre, et d'un parc à un autre. Cette phase dure en moyenne environ 4 ans en Europe et peut aller de moins d'un an jusqu'à 12 ans. C'est au Danemark que cette période est en moyenne la plus courte (moyenne = 0,8 an), tandis qu'elle est la plus longue en Allemagne (moyenne = 6,8) et particulièrement en Italie (moyenne = 8, n=1). La Suède est également rapide avec une durée moyenne de 1,5 ans, suivie par les Pays-Bas et le Royaume-Uni, où cette période dure en moyenne environ 3 ans. La France se situe dans la moyenne avec 4 ans. La durée varie énormément en fonction des PEM, particulièrement en Allemagne (entre 4,5 et 8,5 ans pour 50 % des parcs), alors qu'au Danemark, 100 % des projets ont commencé à être construits au plus tard un an après l'obtention de l'autorisation. Pour la Belgique, 50% des valeurs se situent entre 4 et 6 ans. La **durée de construction** maximale en Europe est de quatre ans et la moyenne est d'environ un an et demi.

Certains pays comme la Suède ou les Pays-Bas ont une durée de construction relativement constante d'un an, alors qu'au Danemark, par exemple, elle peut varier de moins d'un an à 4 ans. Les parcs construits en Allemagne, en France, aux Pays-Bas et au Royaume-Uni ont mis deux ans (médiane) pour achever leur construction. La **durée d'exploitation** maximale est retrouvée au Danemark, avec un parc en exploitation depuis 28 ans. La Suède a également construit son premier parc éolien en mer, il y a 25 ans. Au Danemark, la moitié des parcs ont une durée d'exploitation comprise entre 11 et 20 ans, contre 5 à 13 ans pour 50% des 36 parcs au Royaume-Uni (Figure 26). En Allemagne, 50% des 28 parcs ont une durée d'exploitation d'environ de 5 à 8 ans. Aux Pays-Bas, la moitié des parcs ont une durée d'exploitation comprise entre 2,5 et 7,5 ans contre environ 4 et 10 ans en Belgique.

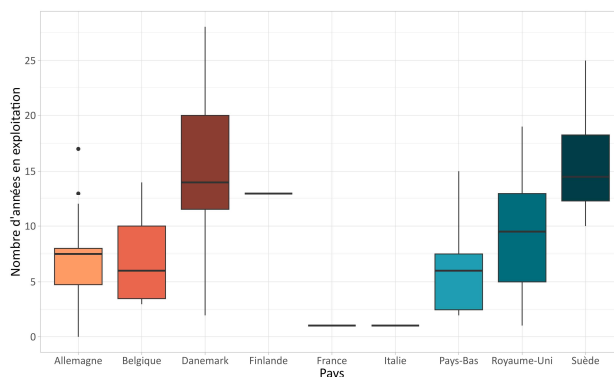


Figure 26 : Représentation statistique du nombre d'années d'exploitation des parcs éoliens en mer en exploitation commerciale, par pays, à fin juin 2023.

L'analyse des PEM en exploitation commerciale en Europe a montré qu'il existe de fortes différences en termes de caractéristiques techniques et/ou environnementales entre les différents pays, mais aussi au sein de chaque pays. Il est impossible de trouver des PEM similaires en tout point entre la situation en France et un autre pays. Mais il est possible de trouver quelques parcs avec des paramètres similaires à ceux des projets français. Afin d'étudier les effets des PEM en exploitation et de conclure sur une possible transposabilité de ces effets en France, une vingtaine de parcs seront sélectionnés pour la suite de l'étude. Cette sélection a pour but de choisir parmi l'ensemble des PEM, ceux avec une large gamme de valeurs, plus ou moins similaires à la France. Les graphiques représentant l'évolution temporelle des paramètres analysés montrent une augmentation avec le temps des hauteurs des turbines et du diamètre des rotors, de la distance à la côte des PEM, ou de la profondeur d'implantation des éoliennes et ce dans la plupart des pays. En l'état actuel des connaissances et au vu des zones à l'étude pour le développement futur de nouveaux PEM en France, il est délicat d'anticiper les caractéristiques qu'auront ces parcs. Cependant, un éloignement des côtes et une augmentation de la puissance des parcs, ainsi que de la taille des éoliennes sont prévisibles. Parmi le panel des PEM actuellement en exploitation en Europe, certains paramètres pourraient être choisis pour les futurs PEM développés en France (distance à la côte), tandis que d'autres paramètres seront plus éloignés (taille du rotor et hauteur des éoliennes). De nombreuses différences entre les PEM en exploitation à date en Europe et les futurs PEM en France sont ainsi dues au contexte temporel. Les PEM en Europe sont en exploitation depuis 9 ans en moyenne et il est fort probable que les futurs PEM en Europe soient similaires à ceux prévus en France, notamment en ce qui concerne les caractéristiques des éoliennes utilisées.



Biotope Siège Social
22, boulevard Maréchal Foch
B.P. 58
34140 MÈZE
Tél. : +33 (0)4 67 18 46 20
www.biotope.fr

