



Éolien offshore

Bilan, perspectives et enjeux



Auteur : Valentin Haro
Relecture : Anaïs Hollard

Sommaire

Introduction	2
Glossaire	3
Évolutions de la capacité installée et bilan 2021	4
Bilan par région	4
Bilan par pays	6
Le cas de l'éolien flottant	7
Éolien en mer : coûts et rendements	8
Analyse en termes de coûts	8
Méthodologie	8
Données	9
Résultats 2019	11
Prévisions à l'horizon 2030 et 2050	13
Analyse en termes de rendements	15
Facteur de charge	15
Puissance nominale	16
Conclusions	17
Les perspectives d'évolution à l'horizon 2030	18
Données	18
Résultats Monde	19
Résultats Europe	20
Objectifs G7	21
Enjeux liés à la biodiversité	22
Impacts sur l'avifaune	23
Mortalité	23
Éloignement	25
Impacts sur la biodiversité marine	26
Effets bénéfiques	26
Conséquences négatives	27
Sources	28
Annexe - Méthodologie	29

Introduction

L'**éolien en mer** - ou éolien offshore - **s'est considérablement développé ces vingt dernières années**. Depuis le premier parc installé en Suède en 1990, les installations offshore se multiplient en Europe et dans le monde. Cette filière présente en effet de **nombreux avantages** par rapport à l'éolien terrestre :

- ✔ **Peu de contraintes en termes d'espace**, ce qui permet d'installer un très grand nombre de turbines, qui peuvent par ailleurs être plus larges et donc produire plus d'électricité ;
- ✔ **Des vents plus puissants et plus réguliers** que sur terre, permettant une intermittence moins élevée ;
- ✔ **Des enjeux de pollution visuelle** plus limités.

À ce jour, les **principaux freins** qui limitent le développement de l'éolien en mer sont les **coûts encore élevés** par rapport aux autres filières EnR ainsi que des **contraintes techniques** liées à la maintenance (notamment pour l'éolien flottant).

D'autres enjeux importants existent également, notamment **l'impact de la filière sur la biodiversité** marine et sur l'avifaune.



La production de ce rapport a pour but d'**éclaircir ces enjeux** et de **dresser un bilan de la filière** éolienne en mer dans le monde et en Europe, en évoquant les **perspectives d'évolution** du secteur. Ce projet a par ailleurs été motivé par les **ambitions fortes des acteurs publics et privés** des différents pays concernant l'éolien offshore, en particulier les objectifs ambitieux de la France : 2,4 gigawatts (GW) d'éolien offshore installés fin 2023 et environ 5 GW fin 2028¹.



La plupart des pistes de résultats reposent sur des **résultats chiffrés issus de plusieurs rapports d'analyse** sur le secteur.

Comme mentionné dans les sections concernées, les échantillons et les méthodes de calculs utilisés pour établir ces données varient d'une source à l'autre. Elles permettent cependant de **dégager des tendances générales** pertinentes. Ce rapport n'a en aucun cas la prétention de proposer des conclusions arrêtées sur le sujet, mais a pour objectif d'**éclaircir les axes principaux du sujet** et de **donner des pistes de réflexion** au lecteur.

¹ "Eolien en mer", Ministère de la Transition Énergétique et Ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires

Glossaire

✓ Éolien en mer posé

Cette technologie représente la majorité des éoliennes en mer présentes dans le monde. Les turbines sont installées dans des eaux profondes de 50 mètres environ au maximum, et sont fixées sur des fondations en acier ou en béton reposant sur le fond marin.

✓ Capacité nouvellement connectée

Capacité installée, observée sur la dernière année étudiée.

✓ Éolien en mer flottant

Ce type d'installations est moins répandu à ce jour, en raison de coûts supérieurs à ceux de l'éolien posés. Les éoliennes en mer flottantes reposent sur des flotteurs ancrés au fond marin par des câbles, et peuvent être installées jusqu'à 200 mètres de profondeur.

✓ CAPEX

Capital expenditure / coûts d'investissement, c'est-à-dire l'investissement nécessaire à la mise en place d'un nouveau système de production électrique. Il inclut généralement les coûts de raccordement au réseau électrique.

✓ OPEX

Operational expenditure / coûts d'opération et de maintenance, correspondant aux coûts fixes et variables liés à l'exploitation d'une installation électrique et à sa maintenance.

✓ LCOE

Levelized cost of energy / coût actualisé de l'énergie, soit le prix auquel l'électricité produite par une centrale électrique doit être vendue pour que cette centrale soit rentable tout au long de son cycle d'exploitation. Il inclut l'ensemble des coûts et des productions de l'installation pour toute sa durée de vie.

✓ Facteur de charge

Rapport entre l'électricité effectivement produite par une installation électrique et celle qu'elle aurait pu produire si elle avait fonctionné à sa puissance maximale théorique durant la même période.

✓ Puissance nominale

Puissance électrique maximale qu'une installation électrique peut fournir en continu dans des conditions nominales de fonctionnement, c'est-à-dire des conditions corrigées des aléas extérieurs (pour une éolienne, vents particulièrement forts ou faibles, interruptions pour cause de maintenance, etc).

✓ Avifaune

Ensemble des espèces d'oiseaux d'une région donnée. L'avifaune comprend des espèces sédentaires et des espèces saisonnières.

✓ Espèces benthiques

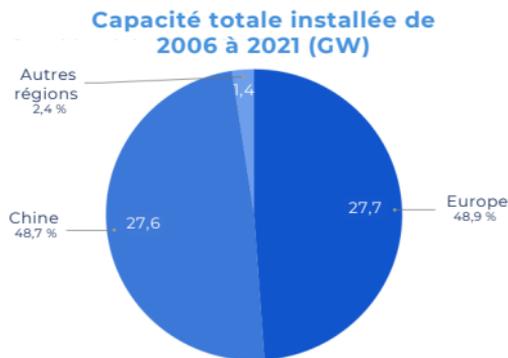
Espèces aquatiques vivant à proximité des fonds marins.

Évolutions de la capacité installée et bilan 2021¹

Les résultats de cette section incluent **uniquement les pays en tête** dans le déploiement de l'éolien offshore, soit les **pays possédant en 2021 une capacité installée supérieure à 2 GW**. Les autres pays ont été regroupés dans les sections "Autres". Ce choix a été fait afin de **privilégier la lisibilité** des comparaisons et des supports graphiques. Il est important de garder en tête que **certains pays qui ne sont pas mentionnés** explicitement pourraient bien voir **leurs parts de marché augmenter de manière significative** dans les années à venir. C'est le cas notamment des États-Unis, qui possèdent seulement 42 mégawatts (MW) de puissance installée en 2021, mais dont les objectifs prévoient d'atteindre 30 GW d'ici 2030².

Bilan par région

En termes de **capacité totale installée**, L'Europe et la Chine ont des résultats proches, avec respectivement 27,7 et 27,6 GW installés de 2006 à 2021. Les autres régions (correspondant aux États-Unis, au Japon, à Taïwan et au Vietnam) représentent à peine 2 % de la capacité totale installée à l'échelle mondiale.

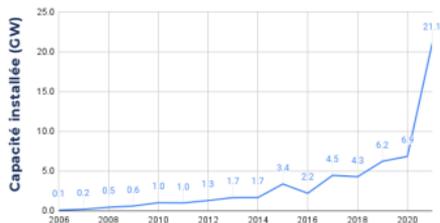


¹ Les données pour cette section sont extraites du rapport "Global offshore wind report 2022", Global wind energy council (GWEC), 29 juin 2022

² "Biden-Harris Administration Announces New Actions to Expand U.S. Offshore Wind Energy", The White House

Le **rythme des installations** d'éoliennes en mer s'est **fortement accru** depuis 2018. Durant la seule année 2021, environ 37 % de la capacité totale actuelle de l'ensemble du globe a été installée.

Capacité mondiale nouvellement installée de 2006 à 2021 (GW)

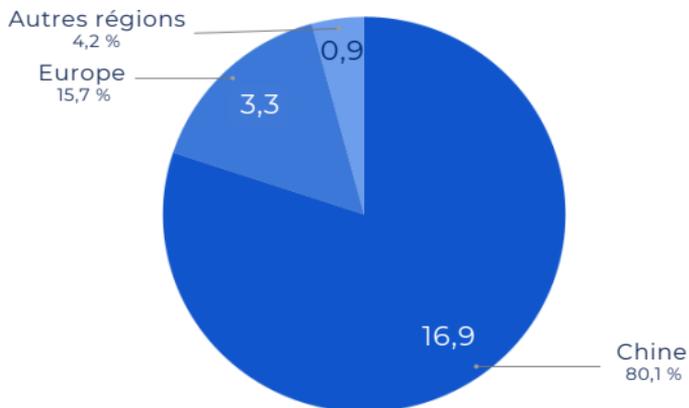


Part de la capacité installée par période (GW)



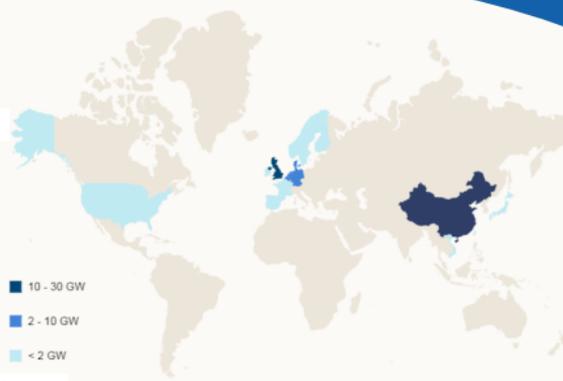
La **Chine** est à l'origine de **80 % des nouvelles installations** pour l'année 2021, l'Europe reste plus en retrait avec 16 % des installations. Les 4 % restants proviennent de nouvelles installations au Vietnam (0,78 GW) et à Taiwan (0,11 GW).

Capacité nouvellement connectée en 2021 (GW)

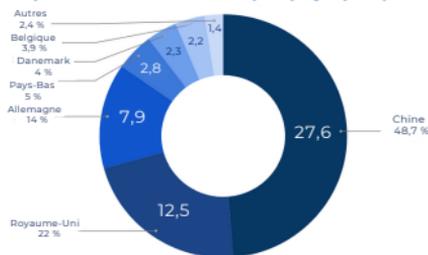


Bilan par pays

En 2021, **dix-huit pays possèdent des éoliennes offshore en fonctionnement¹**, représentés sur la carte ci-contre. Parmi eux, 13 pays possèdent moins de 2 GW installés (en bleu clair), quatre pays possèdent entre 2 et 10 GW installés (Allemagne, Pays-Bas, Danemark et Belgique, en bleu) et deux pays possèdent entre 10 et 30 GW installés (Chine et Royaume-Uni, en bleu foncé).



Capacité totale installée par pays (GW)



Comme vu précédemment, **la Chine domine le secteur de l'éolien offshore avec 48,7 % de la capacité installée**. Le reste de la capacité mondiale se partage surtout entre cinq pays européens. Le parc éolien **offshore britannique représente 12,5 GW**, suivi de près par **l'Allemagne avec près de 8 GW installés**. Le **Danemark, les Pays-Bas et la Belgique** tirent également leur épingle du jeu avec **entre 2 et 3 GW chacun**.

En termes de **capacité nouvellement connectée²**, la Chine est de nouveau en tête avec 16,9 GW raccordés en 2021. Le Royaume-Uni a renforcé la capacité de son parc éolien en mer de 2,3 GW, le Vietnam et le Danemark se sont rapprochés des 1 GW. Les Pays-Bas, Taiwan ont raccordé respectivement 100 et 400 mégawatts, et la Norvège reste en marge avec seulement 3,6 MW installés.

Pays	Capacité nouvellement connectée en 2021 (GW)	Part (%)
Chine	16,9	80
Royaume-Uni	2,3	11
Vietnam	0,779	3,7
Danemark	0,608	2,9
Pays-Bas	0,392	1,9
Taiwan	0,109	0,5
Norvège	0,0036	0,02
Monde	21,106	100

¹ "Éolien offshore : où en est-on dans le monde ?", Vinci, juillet 2022

² 0,008 GW manquent lorsque l'on compare la somme des données du tableau ci-dessus avec la capacité globale nouvellement installée en 2021. Cette différence s'explique par le fait que les valeurs pour chaque pays apparaissent dans le rapport du GWEC arrondies au centième, sans doute à des fins de lisibilité. Ces valeurs arrondies sont certainement la cause de cette légère différence.

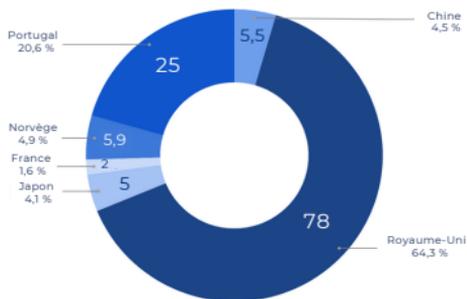
Le cas de l'éolien flottant

L'éolien flottant se **développe moins rapidement que l'éolien en mer posé**. En cause : des contraintes techniques et des coûts encore très élevés. **Fin 2021**, les parcs éoliens flottants représentaient **121,4 MW sur l'ensemble du globe**.

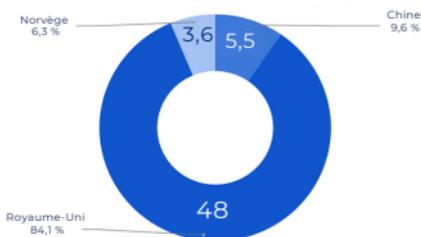


Le Royaume-Uni est en tête dans ce secteur, avec **78 MW installés** dont plus de 60 % (48 MW) sur la seule année 2021. Une accélération significative, qui devra cependant garder le même rythme pour espérer atteindre l'objectif¹ fixé par le Gouvernement britannique de 5 GW d'éolien flottant d'ici 2030.

Capacité totale installée : éolien flottant (MW)



Éolien flottant nouvellement connecté en 2021 (MW)



La **France** détient quant à elle **1,6 % du parc éolien flottant mondial**, avec **2 MW** installés fin 2021. Pour espérer atteindre les objectifs fixés par le Ministère de la Transition Énergétique² de 2,4 GW d'éolien en mer posé et flottant fin 2023 et d'environ 5 GW en 2028, le pays devra **compter sur cette filière** et accélérer sensiblement l'installation de nouveaux parcs éoliens flottants. Le projet d'éoliennes flottantes dans le Golfe du Lion, dont la première étape a démarré le 5 mars 2023, devrait appuyer ces ambitions.

¹"Celtic Sea Floating Offshore Wind", The Crown Estate

²"Eolien en mer", Ministère de la Transition Énergétique et Ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires

Éolien en mer : coûts et rendements

Analyse en termes de coûts

Méthodologie

Les **coûts d'une centrale** de production électrique peuvent être mesurés par divers indicateurs. Nous avons choisi d'utiliser les **trois indicateurs** suivants¹ dans cette section, car leur combinaison permet une décomposition lisible des coûts de production et facilite les comparaisons :

- ✓ Les **coûts d'investissement** ou Capital expenditure (CAPEX), correspondant à l'investissement nécessaire à la mise en place d'un nouveau système de production. Il inclut généralement les coûts de raccordement au réseau électrique.
- ✓ Les **coûts d'opération et de maintenance** ou Operational expenditure (OPEX), correspondant aux coûts fixes et variables liés à l'exploitation de l'installation et à sa maintenance.
- ✓ Le **coût actualisé de l'énergie**, ou Levelized cost of energy (LCOE), qui indique le prix de l'électricité requis pour un projet dont les revenus seraient égaux aux coûts, en prenant en compte un retour sur investissement égal au taux d'actualisation. En somme, le prix auquel l'électricité produite par une centrale doit être vendue pour que cette centrale soit rentable tout au long de son cycle d'exploitation. Le LCOE prend en compte l'ensemble des coûts et des productions de l'installation sur l'ensemble de sa durée de vie.



Pour établir les résultats de cette section, les données de l'Ademe et de la Cour des comptes ont été croisées. Les méthodologies et méthodes de calcul utilisées peuvent varier. Les résultats de ce rapport servent donc avant tout à **donner un ordre de comparaison** entre l'éolien en mer et les autres filières étudiées, et ne sont pas une représentation exhaustive de la réalité.

¹Définitions établies dans le rapport pour la Commission Européenne "Study on energy costs, taxes and the impact of government interventions on investments in the energy", Enerdata et Trinomics, 31 juillet 2020

Afin de faciliter la lisibilité des tableaux en raison de ce croisement de données, le code couleur suivant a été établi :

- ✓ Les cases en **bleu** indiquent que les données proviennent du rapport de l'**Ademe**¹.
- ✓ Les cases en **orange** indiquent que les données proviennent du référentiel de la **Cour des Comptes**².
- ✓ Les cases **grises** représentent quant à elles une **absence de données** pour l'année ou la filière concernée.
- ✓ Enfin, les **données en gras** correspondent aux données en **fourchette haute**, qui sont utilisées pour la construction des différents graphiques. Dans le cas où une seule donnée est indiquée, cela signifie qu'aucune fourchette n'a été trouvée. C'est notamment le cas pour le LCOE de la filière nucléaire ou la comparaison des CAPEX et OPEX entre pays européens.

67

98 - 117

Fourchette basse - **haute**

L'**absence de données pour l'éolien flottant en France en 2019** s'explique par le fait qu'aucun parc éolien flottant français n'existait encore. Par ailleurs, nous n'avons pas trouvé d'estimation suffisamment pertinente pour cette sous-filière, telle que celle établie par la Cour des Comptes pour la filière éolienne posée.

Données

Coûts d'investissement par filière en France (CAPEX en € / kW / an)

	Nucléaire	PV au sol ³	Éolien terrestre	Éolien en mer posé	Éolien en mer flottant
2019		740 - 985	1400 - 1620	2900 - 3700	
2030		450 - 790	960 - 1850	2010 - 3100	3580 - 4320
2050		320 - 550	850 - 1650	2080 - 2650	3275 - 3760

¹Coûts des énergies renouvelables et de récupération en France - 2019, Ademe, janvier 2020

² L'analyse des coûts du système de production électrique en France, Cour des Comptes, septembre 2021

³Photovoltaïque au sol

Coût actualisé de l'énergie par filière en France (LCOE en € / MWh)

	Nucléaire	PV au sol	Éolien terrestre	Éolien en mer posé	Éolien en mer flottant
2019	68,4 ¹	57 - 71	50 - 71	98 - 117	
2030		35 - 47	32 - 58	56 - 88	77 - 97
2050		23 - 32	24 - 46	35 - 54	58 - 71

Coûts d'opération et de maintenance par filière en France (OPEX en € / kW / an)

	Nucléaire	PV au sol	Éolien terrestre	Éolien en mer posé	Éolien en mer flottant
2019		20 - 27	45 - 50	160 - 190	
2030		8 - 18	29 - 48	40,2 - 80,6	71,6 - 97,2
2050		5 - 13	15 - 40	31,2 - 53	65,5 - 75,2

Coûts de l'éolien en mer posé à l'international²

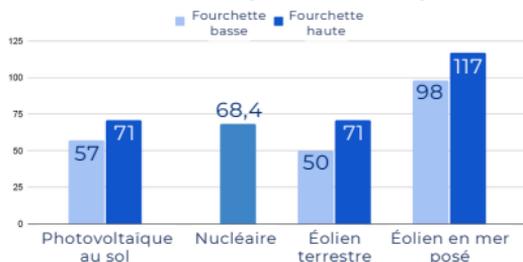
	France	Allemagne	Royaume-Uni	Pays-Bas
CAPEX (€ / kW)	2900 - 3700	3980	3350	4025
OPEX (€ / kW / an)	160 - 190	67	64	69
LCOE (€ / MWh)	98 - 117	69 - 81	68 - 81	78 - 92

¹Coût rapporté à la production 2019, établi par la méthode Cour 2012 - 2014

²Pour dresser ce tableau comparatif, les données françaises correspondent à l'estimation par la Cour des comptes des LCOE de la filière éolienne offshore posée, calculés pour des investissements réalisés en 2020. Pour les trois autres pays, les données sont établies pour des installations mises en service en 2017/2018. Il est donc possible que ces deux années de différence faussent légèrement la comparaison. L'ordre d'idée reste toutefois représentatif.

En 2019, l'éolien en mer se distingue par un **coût actualisé de l'énergie (LCOE) particulièrement élevé** en comparaison avec l'éolien terrestre, la filière photovoltaïque au sol et la filière nucléaire. Le LCOE de l'éolien en mer posé est en moyenne **50 % à 83 % plus élevé** que celui de l'éolien terrestre¹.

Coût actualisé de l'énergie par filière en France en 2019 (LCOE en €/MWh)



La filière nucléaire ne comporte pas de fourchette haute ni de fourchette basse car la Cour des Comptes a estimé cette donnée par une valeur unique.

En **décomposant les coûts**, on observe une **tendance similaire** : l'éolien en mer présente des **coûts d'investissement, d'opération et de maintenance près de trois fois supérieurs** à ceux de l'éolien terrestre, et plus encore à ceux de la filière photovoltaïque au sol.

Coûts d'investissement par filière en France : 2019 (CAPEX en €/kW)



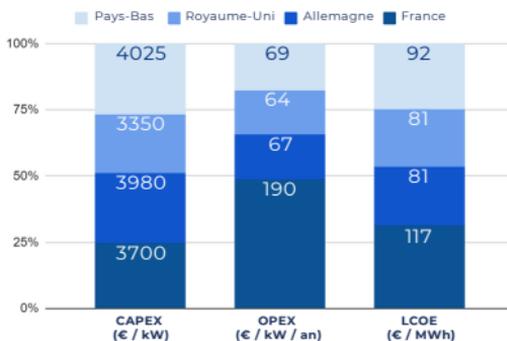
Coûts d'opération et de maintenance par filière en France : 2019 (OPEX en €/kW/an)



¹Fourchette basse : $98 * 50 / 100 = 49\%$. Fourchette haute : $117 * 71 / 100 = 83,07\%$.

La **comparaison entre l'Allemagne, le Royaume-Uni et les Pays-bas** pour l'éolien en mer posé en 2019 établit des résultats sensiblement similaires : un **coût actualisé d'environ 85 € / MWh**, des **coûts d'investissement oscillant entre 3300 et 4000 € / kW** et des **coûts d'opération et de maintenance d'environ 65 € / kW / an**¹. Les estimations de la Cour des Comptes placent la France dans la même fourchette pour les coûts d'investissement, mais présentent des coûts d'opération et de maintenance largement supérieurs (190 € / kW / an en fourchette haute). Conséquence : la **France aurait un LCOE estimé 40 % plus élevé**² que la **moyenne des trois autres pays** comparés. La Cour des Comptes mentionne toutefois que ces **coûts sont représentatifs des premiers appels d'offres** liés à la création de la filière éolienne en mer en France, ce qui explique en partie leur niveau très élevé.

Coûts de l'éolien en mer posé en 2019 : comparaison



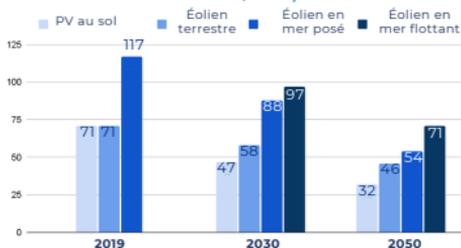
¹Moyenne du LCOE pour les trois pays : $(92 + 81 + 81) / 3 = 84,67$ €. Moyenne des OPEX : $(69 + 64 + 67) / 3 = 66,67$ €

² $(117 - 84,67) / 84,67 = 38,18$ %

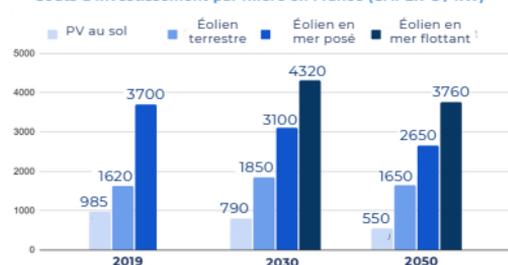


Cette tendance devrait toutefois se lisser dans les vingt prochaines années. D'après les estimations établies par l'Ademe et la Cour des Comptes pour 2030 et 2050, les coûts de l'éolien en mer resteront supérieurs à ceux de l'éolien terrestre et de la filière photovoltaïque, mais devraient s'en rapprocher. Le **LCOE de l'éolien en mer posé en 2050** devrait ainsi atteindre **54 € / MWh, contre 46 € / MWh pour l'éolien terrestre**. L'éolien flottant reste sensiblement plus cher que les autres filières, mais devrait également voir ses **coûts diminuer de l'ordre de 30 % entre 2030 et 2050**².

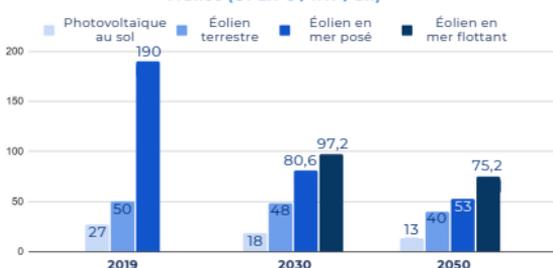
Coût actualisé de l'énergie par filière en France (LCOE en € / MWh)



Coûts d'investissement par filière en France (CAPEX € / kW)



Coûts d'opération et de maintenance par filière en France (OPEX € / kW / an)



¹Afin de faciliter la lisibilité des graphiques, seules les données en fourchette haute ont été utilisées dans cette section.

²Variation du LCOE de l'éolien flottant entre 2030 et 2050 : $(71 - 97) / 97 = - 0,2681 = - 27 \%$

Analyse en termes de rendements

Les rendements d'un parc éolien dépendent principalement de **deux variables** :

- ✓ Le **facteur de charge**, soit le rapport entre l'électricité effectivement produite par l'installation et celle qu'elle aurait pu produire si elle avait fonctionné à sa puissance maximale théorique durant la même période ;
- ✓ La **puissance nominale** des installations, correspondant à la puissance électrique maximale que l'éolienne peut fournir en continu dans des conditions nominales de fonctionnement, c'est-à-dire des conditions corrigées des aléas extérieurs (vents particulièrement forts ou faibles, interruptions pour cause de maintenance, etc).

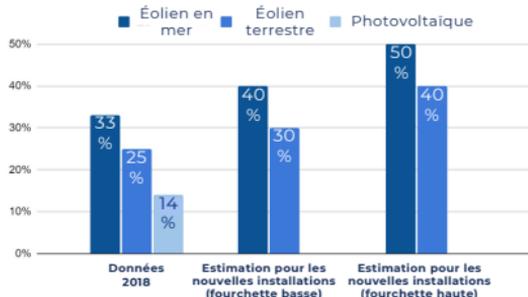
Facteur de charge¹



En 2018, la filière éolienne en mer présente un **facteur de charge moyen 30 % supérieur à celui de l'éolien terrestre** et **135 % supérieur à celui de la filière photovoltaïque**². Les raisons principales de ces écarts proviennent :

- **De vents plus forts et plus réguliers** au large des côtes que sur terre, permettant aux turbines de fonctionner plus souvent à plein potentiel ;
- **D'une taille moyenne des turbines offshore plus élevée**. Le diamètre de la zone moyenne balayée par une turbine offshore standard a augmenté de 230 % entre 2010 et 2016, une évolution difficilement atteignable sur terre en raison de contraintes plus nombreuses (espace requis, pollution visuelle, etc).

Facteur de charge moyen par filière



¹ Les données de cette section sont extraites du rapport "Offshore Wind Outlook 2019", International Energy Agency, 2019

² $(33 - 25) / 25 = 32\%$; $(33 - 14) / 14 = 135,71\%$

Puissance nominale¹



La comparaison entre les turbines offshore et onshore détaillée dans cette section provient d'un **échantillon de pays** dotés d'installations en 2021. La puissance moyenne des turbines est établie à partir de la puissance nominale moyenne des turbines pour chacun de ces pays.

Turbines offshore

Pays	Nombre de turbines	Puissance nominale moyenne (MW)
Royaume-Uni	250	9,3
Danemark	72	8,4
Pays-Bas	90	4,4
Norvège	1	4
Moyenne		6,525

Puissance nominale moyenne des installations existantes (MW)

Éolien en mer	Éolien terrestre
6,53	3,83

Puissance nominale moyenne estimée pour les nouvelles installations (MW)

Éolien en mer	Éolien terrestre
8,5	4



Turbines onshore

Pays	Nombre de turbines	Puissance nominale moyenne (MW)
Allemagne	484	4
Suède	476	4,4
France	418	2,9
Russie	368	3,1
Turquie	277	5,1
Pays-Bas	230	4,1
Finlande	141	4,8
Grèce	128	2,6
Royaume-Uni	95	3,5
Belgique	91	3,4
Ukraine	91	3,9
Autriche	69	4,3
Croatie	48	3,9
Danemark	41	3,6
Kosovo	27	3,9
Moyenne		3,833

¹Données extraites du rapport "Wind energy in Europe - 2021 statistics and the outlook for 2022-2026", WindEurope, 2022

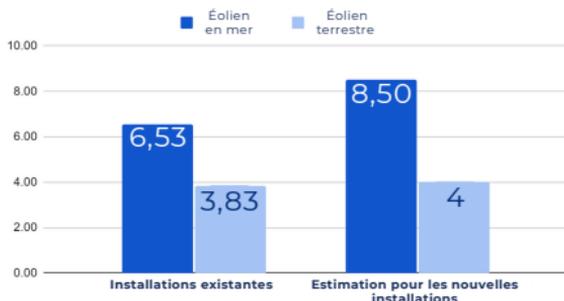
En 2021, les éoliennes offshore installées présentent une **puissance nominale 70 % supérieure à celle des éoliennes terrestres**. L'écart se creuse encore plus pour les **nouvelles installations**, les turbines offshore présentant une **puissance estimée 112 % supérieure** à celle des turbines terrestres¹.

Conclusions

L'éolien en mer présente ainsi un **facteur de charge de l'ordre de 30 % supérieur à celui de la filière terrestre**, et une **puissance nominale des turbines** également largement au-dessus de celle des turbines terrestres (de l'ordre de **+ 70% à + 112 %** en fonction des données observées).

Le **rendement théorique** d'une éolienne en mer est donc **largement supérieur** à celui d'une éolienne terrestre. À en croire les estimations pour les installations futures, **cette tendance devrait s'accroître**. Ce phénomène, couplé à la **baisse progressive des coûts** à l'horizon 2030/2050, devrait donc rendre **l'éolien en mer particulièrement compétitif** face aux autres filières.

Puissance nominale moyenne des installations en 2021 (MW)



¹(6,53 - 3,83) / 3,83 = 70,50 % ; (8,5 - 4) / 4 = 112,50 %

Les perspectives d'évolution de l'éolien en mer à l'horizon 2050

Données

Les graphiques de cette section sont établis à partir de la **colonne prévisionnelle pour la période 2022 - 2031** des tableaux suivants, dont les données ont été calculées à partir des résultats extraits du rapport du GWEC¹.

Estimation de la capacité nouvellement connectée dans le monde entre 2022 et 2031 (GW)

Région	2022 - 2031	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
Europe	140.75	3.17	4.95	2.98	7.38	10.49	15.05	17.64	23.25	26.50	29.35
Chine	98.00	4.00	6.00	8.00	10.00	11.00	11.00	12.00	12.00	12.00	12.00
Asie sauf Chine	35.25	1.88	1.54	1.56	3.26	2.75	3.90	4.00	5.25	4.00	7.10
Amérique du Nord	35.03	0.00	0.95	1.52	4.72	4.35	4.00	4.67	4.00	6.42	4.40
Autres pays	5.99	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.40	1.58	2.00	2.00
Total Monde	315.02	9.06	13.44	14.07	25.36	28.59	33.95	38.71	46.08	50.92	54.85

Estimation de la capacité nouvellement connectée dans le monde entre 2022 et 2031 (GW)

Pays	2022 - 2031	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
Royaume-Uni	37.6	1.46	1.75	1.66	2.14	4.60	4.50	4.50	5.00	5.50	6.50
Allemagne	20.6	0.34	0.27	0.718	1.80	0.96	0.98	2.00	4.00	4.50	5.00
Pays-Bas	18.6	0.48	1.53	0.53	1.40	0.70	2.00	3.00	3.00	3.00	3.00
Danemark	15.1	0.77	0.35	0.05	0.25	0.72	2.00	2.00	3.00	3.00	3.00
France	9.4	0.09	1.03	0.01	0.99	0.27	1.00	1.00	1.50	1.50	2.00
Belgique	3.5	0.00	0.01	0.00	0.00	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.00
Pologne	10.6	0.00	0.02	0.01	0.35	1.32	2.37	1.50	1.50	1.50	2.00
Irlande	6.2	0.00	0.01	0.00	0.00	0.38	1.20	1.20	1.20	1.00	1.25
Norvège	3.9	0.03	0.00	0.00	0.00	0.85	0.00	0.50	0.50	1.00	1.00
Autres pays européens	15.2	0.00	0.00	0.00	0.45	0.00	0.30	1.24	2.85	4.80	5.60
Total Europe	140.8	3.17	4.95	2.98	7.38	10.49	15.05	17.64	23.25	26.50	29.35

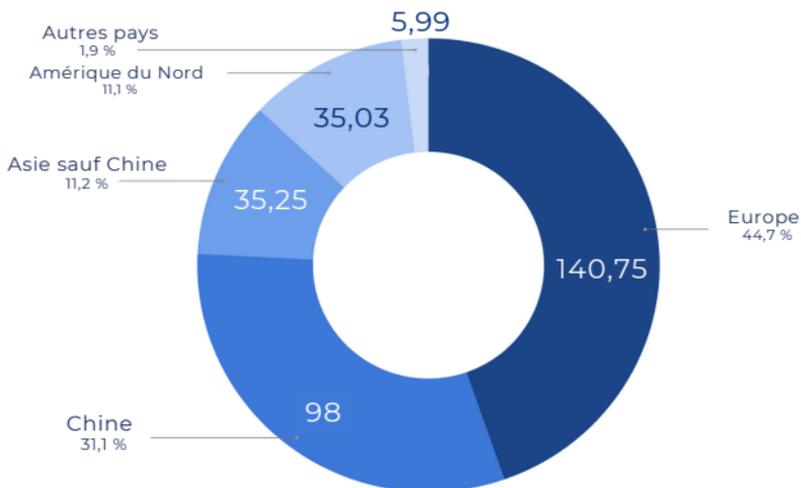
¹"Global offshore wind report 2022", Global wind energy council, 29 juin 2022



Résultats Monde

D'après les données du Global Wind Energy Council, **315 GW d'éolien en mer** devraient être connectés dans le monde entre 2022 et 2031. **L'Europe devrait dominer cette dynamique** avec plus de 140 GW connectés, soit **45 % de la nouvelle capacité** installée. **La Chine** devrait suivre avec **près de 30 % des nouveaux parcs**, soit une puissance d'une centaine de gigawatts. Enfin, **les autres pays d'Asie et l'Amérique du Nord** devraient totaliser **chacun 35 nouveaux GW** d'éolien offshore, soit environ 11 % des nouvelles installations.

Capacité nouvellement connectée entre 2022 et 2031 dans le monde : prévisions (GW)

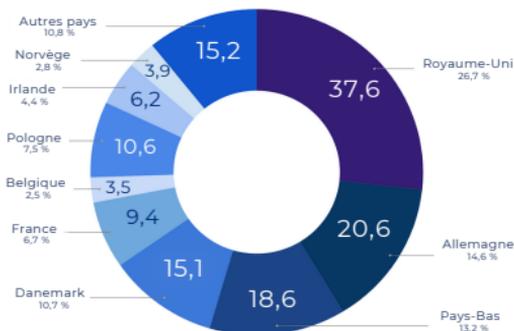




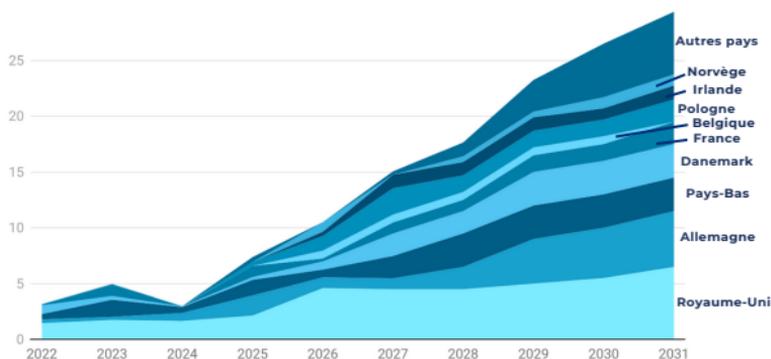
Résultats Europe

En Europe, le **Royaume-Uni** devrait continuer à **dominer le marché** avec presque **38 GW nouvellement connectés** d'ici 2031, suivi de l'**Allemagne** et des **Pays-Bas** avec **chacun environ 20 GW** supplémentaires. La **France** devrait également tirer son épingle du jeu et se placer en **septième position**, avec **9,4 GW**, soit environ **7 % de la capacité nouvellement connectée** en Europe sur la période.

Capacité nouvellement connectée entre 2022 et 2031 en Europe : prévisions (GW)



Capacité nouvellement connectée en Europe entre 2022 et 2031 : prévisions (GW)



Créé avec Datawrapper

Objectifs G7



Le 16 avril 2023, les ministres de l'Énergie, du Climat et de l'Environnement des **pays industrialisés participant au G7** ont promis d'**augmenter drastiquement la capacité installée d'éolien en mer** dans les dix prochaines années¹.

Les objectifs sont ambitieux : **150 gigawatts supplémentaires installés d'ici à 2030**. Ce chiffre dépasse largement **les prévisions** établies par le Global wind energy council, de **74,7 GW supplémentaires² connectés** dans les pays membres du G7 entre 2022 et 2031.

Objectifs du G7 trop ambitieux ou prévisions du GWEC pessimistes, il est encore difficile de se prononcer.

Pays membre du G7	France	Royaume-Uni	États-Unis + Canada	Allemagne	Japon	Italie	Total
Capacité nouvellement connectée entre 2022 et 2031 : prévisions (GW)	9,4	37,6	35,03	20,06	5,7	1,35	74,7

¹ "Climat : le G7 promet « d'accélérer » la sortie des énergies fossiles", Les Échos, 16 avril 2023

² Prévision des capacités installées entre 2022 et 2031 dans les pays membres du G7, établie à partir du tableau ci-dessus. Données extraites du "Global offshore wind report 2022" du GWEC, voir section "Les perspectives d'évolution de l'éolien en mer à l'horizon 2050".

Enjeux liés à la biodiversité

L'une des principales critiques adressée à l'encontre de l'énergie éolienne concerne son impact sur la biodiversité, en particulier sur l'**avifaune**. De nombreuses associations pointent du doigt les **éoliennes**, qui **perturbent les trajets des oiseaux et chauves-souris et provoquent des collisions**. Avec l'éolien en mer s'ajoute un autre enjeu : celui des **écosystèmes marins** et des espèces aquatiques, potentiellement affectés par le déploiement de nouveaux parcs.

Il est cependant **difficile d'établir des résultats définitifs** en l'**absence de données chiffrées entièrement fiables**. La mortalité constatée, correspondant au nombre de cadavres retrouvés près des éoliennes, ne permet pas d'estimer précisément l'impact réel des installations sur les espèces : certains oiseaux ou chauves-souris seulement blessés s'échouent quelques centaines de mètres plus loin, d'autres peuvent vivre quelques heures supplémentaires mais demeurer gravement blessés. En mer, la problématique est plus importante encore, puisqu'il est **extrêmement difficile de retrouver les oiseaux tués**, les courants les emportant au loin. La tâche est également épineuse en ce qui concerne l'impact sur les espèces marines, en l'absence de système d'observation sous-marin fiable.



Certaines **méthodes calculatoires** (Winkelmann, Erickson, Jones...) permettent d'estimer plus précisément l'effet des éoliennes sur la mortalité des espèces, mais les résultats restent encore mitigés.

Ce rapport propose néanmoins plusieurs **pistes de réflexion** concernant les enjeux. **Les résultats** mentionnés proviennent de données estimées ou incomplètes et **ne reflètent pas nécessairement l'impact réel de la filière** sur la biodiversité. Ils demeurent toutefois une matière pertinente, pour mieux s'interroger sur les conséquences des filières de l'éolien offshore et onshore, en pleine extension.

Impacts sur l'avifaune

Mortalité

Comme mentionné précédemment, il est à ce jour **très compliqué d'observer** - et même d'estimer avec une précision suffisante - **les impacts de l'éolien en mer** sur les espèces aviaires. Cependant, les impacts de l'éolien terrestre sur l'avifaune ont été plus précisément mesurés. Des différences existent certainement entre les deux filières, le propos doit donc principalement servir à donner un ordre d'idée.

Une **étude de suivi**¹ menée de 1997 à 2015 par la Ligue pour la Protection des Oiseaux (LPO) à partir des données relevées pour 91 parcs éoliens français établit que les cas de mortalité directe imputables aux éoliennes sont de :

- ✓ 1 102 cas pour les oiseaux, soit 0,7426 oiseau tué par éolienne et par année de suivi
- ✓ 1 279 cas pour les chauves-souris

Cependant, l'étude précise que ces **résultats sont peu représentatifs**. De plus, les données de prospection ne sont pas toujours pertinentes ni comparables. Les surfaces prospectées et les durées entre les prospections varient, et le nombre de cadavres retrouvés est souvent insuffisant pour réaliser une extrapolation.



Pour **préciser ces résultats jugés peu robustes**, la LPO a donc **appliqué aux observations les formules** Winkelmann (1989), Erickson (2000), Jones (2009) et Huso (2010). Ces formules prennent en compte les variables suivantes afin d'affiner les résultats des observations :

- ✓ La surface réellement prospectée ;
- ✓ Le taux de détection (dépendant de la couverture végétale et de l'efficacité de l'observateur) ;
- ✓ La durée entre les prospections ;
- ✓ La durée moyenne de persistance des cadavres (dépendant des prédateurs et des nécrophages).

¹ "Le parc éolien français et ses impacts sur l'avifaune", LPO, juin 2017

Seuls 8 parcs éoliens sur les 91 ont pu être considérés, les autres ne présentant pas les caractéristiques nécessaires pour mener un calcul pertinent (durée trop importante entre les prospections, surface prospectée trop faible, nombre de cadavres insuffisant...). Pour ces huit parcs, après correction des différents biais (présence d'un silo à grains pour un parc, non prise en compte des cadavres projetés au-delà de 50 mètres pour les autres...), la **mortalité réelle estimée varierait de 6,6 à 7,2 oiseaux tués par éolienne et par an.**



Il n'est pourtant **pas certain que les parcs éoliens en mer soient aussi mortels que sur terre.** En effet, les turbines sont généralement plus espacées que sur terre et plus facilement identifiables par les oiseaux, les espèces aviaires auraient donc tendance à les éviter plus souvent. Une étude¹ publiée en 2023 portant sur les 11 éoliennes du parc offshore d'Aberdeen en Écosse enregistre les résultats de deux ans de surveillance vidéo. Les résultats de cette étude indiquent que **seulement 5,76 % des oiseaux cibles observés volent à moins de dix mètres de la zone de balayage** des pales, soit **180 oiseaux** seulement.

Ces **résultats très contrastés** avec l'étude de la LPO sont cependant à considérer eux aussi avec **prudence**. En effet :

- ✔ L'étude porte sur une **durée d'observation de deux ans seulement** et sur **un seul parc éolien**. Les populations et trajets d'oiseaux peuvent varier sensiblement d'un lieu à l'autre, et une étude appliquée à plusieurs parcs et sur une longue période reste nécessaire pour dresser des résultats généralisables.
- ✔ Les observations portent **uniquement sur les activités de vol diurnes**, et certains oiseaux marins tels que les pétrels chassent et vivent majoritairement la nuit.

¹"Resolving Key Uncertainties of Seabird Flight and Avoidance Behaviours at Offshore Wind Farms", Vattenfall, février 2023

Éloignement

La **mortalité n'est pas le seul critère** à prendre en compte lorsqu'on considère l'impact des éoliennes en mer sur la biodiversité. En effet, **les espèces** peuvent avoir tendance à **s'éloigner massivement des parcs éoliens**, ce qui n'est pas sans conséquence pour l'avifaune.

Une étude récente¹ publiée par des chercheurs allemands a cherché à analyser les **effets des parcs éoliens offshore sur les déplacements d'oiseaux**. L'étude repose sur des données collectées entre 2000 et 2017 dans cinq parcs offshore en Mer du Nord, portant sur les populations de huards à gorge rouge², une espèce d'oiseaux marins très répandus en Europe du Nord.

Les résultats sont frappants : **après la construction d'un parc éolien en mer, les populations d'oiseaux chutent fortement, de 94 % dans un rayon d'un kilomètre et de 52 % dans un rayon de 10 kilomètres**. Par ailleurs, sur l'ensemble des cinq parcs étudiés, les estimations indiquent que la population de huards est passée de 35 865 individus initialement à seulement 24 672 après la construction, ce qui semble indiquer qu'une **partie significative des oiseaux s'est possiblement déplacée au-delà de dix kilomètres**.

L'étude précise qu'il est **difficile d'établir quelles sont les conséquences précises** de ces déplacements d'oiseaux. Il n'est pas impossible que les oiseaux finissent par s'habituer aux constructions et par réintégrer leurs habitats à terme. En revanche, en s'éloignant des éoliennes, les **oiseaux ont tendance à se concentrer** dans les mêmes espaces, ce qui engendre une "forte pression négative" sur les huards. En effet, **la nourriture peut venir à manquer**, ce qui risque d'entraîner plusieurs conséquences : une condition physique réduite, un départ vers les aires de reproduction retard et de moindres chances de reproduction. À terme, ces éléments risquent ainsi de **dégrader fortement la population d'oiseaux** dans ces espaces.



¹ "Large-scale effects of offshore wind farms on seabirds of high conservation concern", Stefan Garthe & alii, avril 2023

² Oiseaux marins de la famille des gaviiformes, aussi appelés Plongeurs catmarins

Impacts sur la biodiversité marine

Effets bénéfiques¹

L'un des effets bénéfiques les plus connus des éoliennes en mer est l'**effet récif artificiel**. Les bases des éoliennes, qu'il s'agisse de fondations en béton ou de flotteurs, servent en effet de **point d'ancrage aux espèces benthiques** (moules, anémones...). Celles-ci attirent à leur tour d'autres espèces le long de la chaîne alimentaire, ce qui contribue à **créer de nouveaux habitats riches en diversité**.



Un **effet réserve** peut également voir le jour dans le cas où le **parc éolien est fermé à la pêche**. Les espèces aquatiques s'y renouvellent plus facilement à l'abri des bateaux de pêche. Il n'est toutefois **à ce jour pas prouvé que le nombre d'animaux augmente au total**. Il est possible que les animaux aient simplement tendance à se concentrer autour des parcs éoliens et à se raréfier dans les zones de pêche.

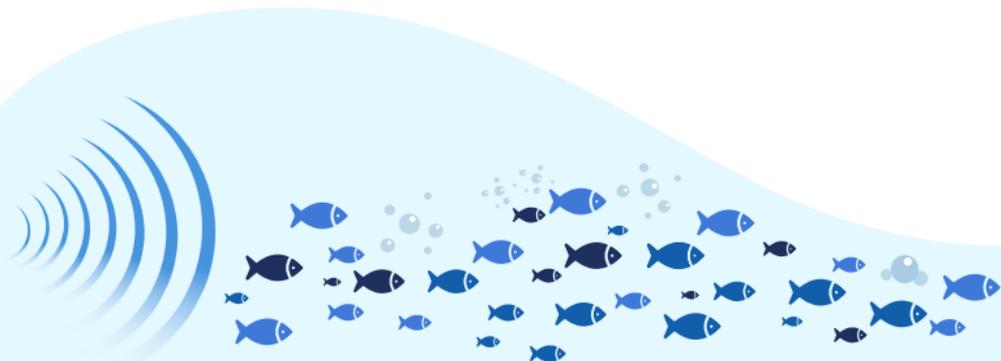
¹"Éoliennes : des retombées contrastées pour la biodiversité marine", Nathalie Niquil, janvier 2022

Conséquences négatives

Les **impacts néfastes** de l'éolien en mer sur la biodiversité marine surviennent en réalité **majoritairement au moment de la construction des nouveaux parcs**. La cause principale : le bruit produit lors du battage des pieux, générant une nuisance sonore importante pour les espèces. Des **effets traumatiques** sur le système auditif de certaines espèces peuvent survenir en cas d'exposition trop proche ou trop intense. D'après un rapport du CNRS sur les impacts acoustiques de l'éolien en mer¹, les résultats de quatre études démontrent qu'une **mortalité est observée chez les poissons dans 25 % des cas lors d'opérations de battage des pieux**. Plus la distance avec la source du son est proche, plus les effets sont importants.

Des **réactions temporaires d'évitement** ont également été observées chez des populations de phoques lors des phases de construction, et ce, **jusqu'à 25 kilomètres de distance**². À ce jour, **aucun effet à long terme n'est démontré** sur ces espèces, et un retour à la normale est généralement observé après quelques jours. Cependant, **les études sur les effets réels** des travaux de construction **sont peu nombreuses** en raison de leur complexité.

Même à des **distances plus éloignées**, les **bruits** générés par les chantiers peuvent **perturber la communication** entre les espèces, notamment le processus d'**écholocation** utilisé par de nombreux mammifères marins, et ce, **jusqu'à une distance de 40 km**³.



¹"Impacts acoustiques des projets éoliens en mer sur la faune marine", CNRS, novembre 2021

²Section 2.2.1.2 du rapport du CNRS

³Distance de masquage des clics d'écholocation pour le grand dauphin, section 3.1.5.1 du rapport du CNRS

Sources

- **“Technologies éoliennes en mer”**, Éoliennes en mer en France, Ministère de la Transition Énergétique
- **“Global offshore wind report 2022”**, Global wind energy council (GWEC), juin 2022
- **“Biden-Harris Administration Announces New Actions to Expand U.S. Offshore Wind Energy”**, The White House
- **“Éolien offshore : où en est-on dans le monde ?”**, Vinci, juillet 2022
- **“Celtic Sea Floating Offshore Wind”**, The Crown Estate
- **“Éolien en mer”**, Ministère de la Transition Énergétique et Ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires
- **“Final Report Cost of Energy (LCOE) : Energy costs, taxes and the impact of government interventions on investments”**, Enerdata et Trinomics pour la Commission Européenne, juillet 2020
- **“Coûts des énergies renouvelables et de récupération en France - 2019”**, Ademe, janvier 2020
- **“L'analyse des coûts du système de production électrique en France”**, Cour des Comptes, septembre 2021
- **“Offshore Wind Outlook 2019”**, International Energy Agency, octobre 2019
- **“Wind energy in Europe - 2021 statistics and the outlook for 2022-2026”**, WindEurope, février 2022
- **“Climat : le G7 promet « d'accélérer » la sortie des énergies fossiles”**, Les Échos, 16 avril 2023
- **“Le parc éolien français et ses impacts sur l'avifaune : Étude des suivis de mortalité réalisés en France de 1997 à 2015”**, Ligue pour la Protection des Oiseaux, juin 2017
- **“Resolving Key Uncertainties of Seabird Flight and Avoidance Behaviours at Offshore Wind Farms”**, Groupe Vattenfall, février 2023
- **“Large-scale effects of offshore wind farms on seabirds of high conservation concern”**, Stefan Garthe & alii, avril 2023
- **“Éoliennes : des retombées contrastées pour la biodiversité marine”**, Polytechnique Insights, Nathalie Niquil, janvier 2022
- **“Impacts acoustiques des projets éoliens en mer sur la faune marine”**, CNRS, novembre 2021

Annexe - Méthodologie

Les pistes de résultats de cette étude reposent sur des **données chiffrées issues de plusieurs rapports d'analyse** sur le secteur, provenant de diverses sources institutionnelles ou cabinets d'analyse. Les **échantillons et les méthodes de calculs** utilisés pour établir ces données **varient d'une source à l'autre**, ce qui peut impliquer de légères imperfections dans les comparaisons. De plus, **il a parfois fallu réaliser des extrapolations** à partir de données arrondies ou indiquées seulement en pourcentages. De même, nous avons parfois **arrondi certaines données** dans un objectif de lisibilité des graphiques.

Par ailleurs, les **données utilisées pour établir les résultats en termes de capacité installée** sont celles de **2021**. En cause : l'absence de données plus récentes suffisamment pertinentes au moment de l'élaboration de l'étude.

L'ensemble de ces éléments peut donc conduire à de **légères imprécisions**. Cette étude n'a cependant **aucunement la prétention de proposer des conclusions arrêtées** sur le sujet. Elle aide simplement à **éclaircir les enjeux principaux** de l'éolien offshore et à **donner des pistes de réflexion** au lecteur. **Les tendances générales établies restent pertinentes**, il convient toutefois de ne pas interpréter les chiffres trop littéralement.

Nous rappelons également que les données source de l'étude sont accessibles **sur simple demande à Selectra**.

La **méthodologie utilisée pour chaque section** est détaillée ci-dessous :

Évolutions de la capacité installée et bilan 2021

Les résultats de la section "Évolutions de la capacité installée et bilan 2021" reposent exclusivement sur les données du rapport "Global offshore wind report 2022" du Global wind energy council (GWEC). Afin de faciliter la lisibilité, seuls les pays possédant en 2021 une capacité installée supérieure à 2 GW ont été spécifiés, les autres sont regroupés dans les sections "Autres". Seule exception : la sous-section sur l'éolien flottant, pour laquelle l'ensemble des pays concernés ont été répertoriés, car ils sont peu nombreux.

Le graphique et le tableau concernant la capacité nouvellement connectée en 2021 (Monde et Europe) sont établis directement à partir des puissances installées (en GW) indiquées dans la section "Market status 2021" du rapport du GWEC.

Pour les graphiques concernant la capacité totale installée de 2006 à 2021 par région, les valeurs en GW ont été extraites du graphique "New offshore installations 2006-2021 (MW)" pour chaque année, puis additionnées. Les deux graphiques "Part de la capacité installée par période" et "Capacité mondiale nouvellement installée de 2006 à 2021" sont construits selon la même méthode.

Il a par ailleurs fallu extrapoler certaines données pour le graphique "Capacité totale installée par pays". Les données pour tous les pays sauf la Chine et la Belgique (dont les capacités installées en GW sont directement mentionnées) sont construites selon la méthode suivante :

- 1 On dresse deux colonnes, "Capacité totale installée par pays" et "Pourcentage".
- 2 La capacité totale installée par pays entre 2006 et 2021 dans le monde, soit 56,7 GW, sert de base à 100 % dans la colonne Pourcentage. Cette capacité totale installée a été obtenue plus tôt en additionnant les valeurs annuelles en GW du graphique "New offshore installations 2006-2021" (rapport du GWEC).
- 3 Les données pour la Chine et la Belgique en GW (27,6 et 2,2 GW) sont ajoutées dans la première colonne, et on calcule leur équivalent en pourcentage. On obtient respectivement 48,7 et 1,2 %.
- 4 Les pourcentages restants sont complétés à partir du graphique "Total offshore wind installations by market" du rapport du GWEC, sauf pour la ligne "Autres". Celle-ci est simplement égale au reste, soit = 100 % - (somme des % des autres pays).
- 5 On extrapole ensuite par un produit en croix les capacités en GW des pays manquants à partir de la valeur totale 56,7 GW et des pourcentages entrés à l'étape précédente.

Exemple : Pour la capacité totale installée en Allemagne, le graphique du GWEC indique 14 % du total. On indique 14 % dans la colonne Pourcentage, puis on calcule : Capacité totale en GW = 0.14 x 56.7 = 7.938, qu'on arrondit à 7,9.

Éolien en mer : coûts et rendements

Pour établir les résultats de la sous-section "Analyse en termes de coûts", le rapport de l'Ademe "Coûts des énergies renouvelables et de récupération en France - 2019" a servi de base principale à l'élaboration des tableaux. Cependant, pour pouvoir obtenir des données pour l'éolien en mer posé en France à l'horizon actuel mais également établir une comparaison internationale, il a fallu croiser ces résultats avec le référentiel publié par la Cour des comptes en 2019, "L'analyse des coûts du système de production électrique en France".

La Cour des comptes a en effet effectué sa propre estimation des LCOE, CAPEX et OPEX de la filière éolienne offshore posée en 2020*. C'est sur cette estimation qu'ont été établis certains résultats de cette section. L'écart d'un an entre les données de l'Ademe (2019) et celles de la Cour (2020), et la différence de méthode de calcul entre les deux rapports, implique donc probablement de légères imprécisions. Malgré cela, Selectra a tenu à établir cette comparaison plutôt que de laisser uniquement des prévisions à l'horizon 2030 et 2050, moins représentatives des réalités actuelles.

Le coût actualisé de l'énergie (LCOE) de la filière nucléaire (68,4 € / MWh) est également présenté dans l'un des tableaux et dans le graphique correspondant. Cette donnée a été indiquée car il semblait important de donner un ordre de comparaison avec la première filière de production électrique en France. Pour rappel, le nucléaire représentait 63 % de la production d'électricité en 2022 d'après le dernier bilan de RTE.

La sous-section "Analyse en termes de rendements" repose quant à elle sur les données de deux rapports : l'étude de l'International Energy Agency, "Offshore wind outlook 2019" et celle de l'institut WindEurope, "Wind energy in Europe - 2021 statistics and the outlook for 2022-2026". Les données sont exploitées telles qu'elles dans le rapport.

**Définitions dans la section "Analyse en termes de coûts - Méthodologie"*

Les perspectives d'évolution de l'éolien en mer à l'horizon 2050

Les colonnes 2022 à 2031 des deux tableaux de cette section ont été construites à partir de la section "Global Offshore Market Outlook to 2031" du rapport du GWEC, en récupérant les estimations en GW pour chaque pays, chaque année. La colonne "2022-2031" a ensuite été établie en faisant une somme des capacités installées chaque année. Comme indiqué dans l'étude, les graphiques reposent sur cette colonne "2022-2031".

Pour la sous-section "Objectifs G7", le tableau récapitulatif de la capacité nouvellement connectée entre 2022 et 2031 dans les pays membres du G7 a été établi à partir des données du rapport du GWEC. La valeur pour la colonne États-Unis + Canada correspond à celle pour l'Amérique du Nord indiquée dans la sous-section précédente, les deux pays n'ont pas été séparés en l'absence de données distinctes pour l'un et l'autre. La valeur pour l'Italie a été établie à partir de la section "Floating Offshore Market Outlook to 2031" du rapport du GWEC, et concerne les projections d'installation d'éoliennes flottantes en 2029, 2030 et 2031, pour $0,35 + 0,5 + 0,5 = 1,35$ GW au total.

Enjeux liés à la biodiversité

Comme mentionné en introduction de cette section, il est difficile de trouver des données entièrement fiables sur les enjeux liés à la biodiversité. Le développement de la filière étant assez récent, les conséquences sur la biodiversité sont encore difficiles à observer, sans compter que les études reposant sur des observations suffisamment pertinentes restent rares. Cette section s'est ainsi rapidement destinée à être moins orientée "chiffres" que les autres, mais à proposer toutefois des pistes de réflexion illustrées par quelques résultats chiffrés représentatifs. Aucun calcul complémentaire de la part de Selectra n'a donc été réalisé.

