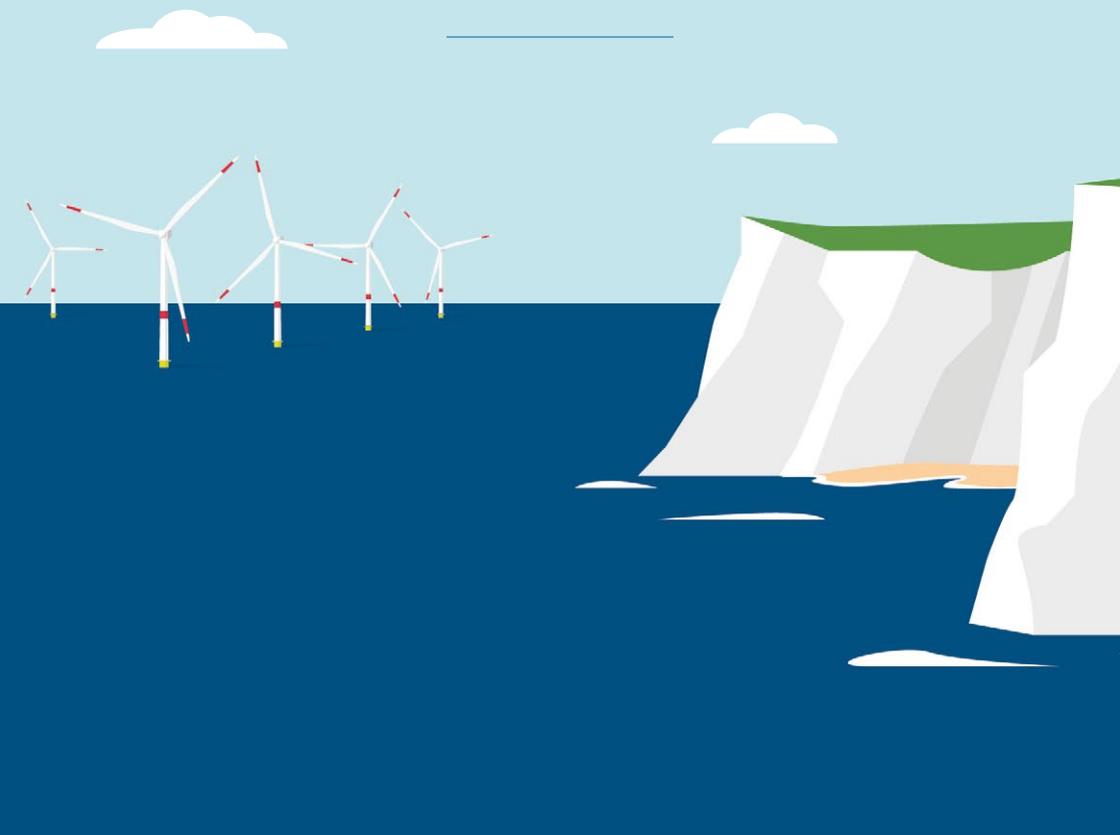


QUESTIONS-RÉPONSES

L'éolien en mer

ÉDITION 2024



QUESTIONS-RÉPONSES

L'éolien en mer

ÉDITION 2024

PRÉAMBULE

L'éolien en mer : une énergie indispensable pour allier lutte contre le réchauffement climatique, souveraineté énergétique et prospérité

En ce début d'année 2024, la France dispose d'un premier parc éolien en mer en service, tandis que trois autres sont en phase de construction. D'ici fin 2024, quatre parcs au large de nos côtes fourniront de l'électricité à 3,3 millions de Français.

Les énergies renouvelables, et l'éolien en mer en particulier, sont indispensables pour réduire nos émissions de gaz à effet de serre et lutter contre le réchauffement climatique. Elles nous permettent d'électrifier et de décarboner des secteurs particulièrement émetteurs de CO₂, tels que les transports, l'industrie et le bâtiment.

L'accélération indispensable et urgente de leur développement constitue également une opportunité majeure pour densifier le tissu industriel français, créer des milliers d'emplois, améliorer considérablement notre balance commerciale et offrir aux territoires et à leurs habitants, comme à l'industrie, des solutions énergétiques durables, compétitives et locales. Elles représentent aussi un rempart contre la destruction de la biodiversité accélérée par le changement climatique.

Même dans le cas d'une relance importante du programme nucléaire, les scénarios énergétiques développés par RTE (Réseau de Transport d'Electricité) montrent tous que la France ne pourra pas produire assez d'électricité sans développement massif de l'éolien en mer. Le Président de la République l'a d'ailleurs rappelé en novembre 2023 en fixant l'objectif d'une cinquantaine de parcs éoliens en mer en 2050 pour un volume minimal de 45GW installés. Cet engagement fait suite à la signature en mars 2022 d'un « Pacte éolien en mer » qui prévoit un objectif intermédiaire de 18GW mis en service à l'horizon 2035. Enfin, Agnès PANNIER RUNACHER, alors ministre de la Transition énergétique, a annoncé fin septembre 2023 que, dès 2025, sera lancé un appel d'offres de 10GW, l'équivalent de 20 parcs éoliens.

Alors que le développement de l'éolien en mer constitue une véritable nécessité pour assurer l'approvisionnement énergétique de notre pays et qu'un large débat public s'achève en avril 2024 pour identifier les futures zones d'implantation des parcs à venir, le Syndicat des énergies renouvelables (SER) souhaite, à travers ce document, apporter un maximum de réponses aux questions légitimes que se posent les Français. Quel impact sur l'environnement et sur les autres usagers de la mer ? Quels coûts ? Quels modes de cohabitation avec la pêche ? Quelles retombées pour les territoires ? Voici quelques-unes des questions auxquelles cette publication s'efforce de répondre en se fondant sur les toutes dernières données disponibles fin 2023.

Bonne lecture !

SOMMAIRE

PRÉAMBULE.....	2
INTRODUCTION.....	7
<i>Qu'est-ce qu'une éolienne en mer ?</i>	8
<i>Qu'est-ce qu'un parc éolien en mer ?</i>	10
<i>Quelle surface maritime pour un parc de 1 000 MW ?</i>	11
<i>Quelles différences entre un parc éolien flottant et un parc éolien posé ?</i>	12
<i>Une éolienne en mer produit-elle de l'électricité en permanence ?</i>	14
<i>Qui intervient sur un parc éolien en mer ?</i>	17
CHAPITRE 1.	
POURQUOI EST-IL ESSENTIEL DE DÉVELOPPER L'ÉOLIEN EN MER ? ...	19
1.1. <i>Quelle est la situation de l'éolien en mer en Europe et dans le monde ?</i>	21
1.2. <i>Quelles perspectives pour l'éolien en mer ?</i>	22
1.3. <i>Quelles perspectives pour la filière française ?</i>	25
CHAPITRE 2.	
L'ÉOLIEN EN MER : COMMENT SE CONSTRUIT ET COMMENT FONCTIONNE UN PARC ?	27
2.1. <i>Quelles sont les principales étapes d'un projet éolien en mer ?</i>	28
2.2. <i>Comment et par qui les zones des projets éoliens en mer sont-elles choisies ?</i> ..	30
2.3. <i>Comment le développement de l'éolien en mer est-il réglementé ?</i>	32
2.4. <i>Qui fabrique et assemble les éoliennes en mer ?</i>	34
2.5. <i>Quelles sont les étapes d'installation d'un parc ?</i>	36
2.6. <i>Comment les éoliennes sont-elles raccordées au réseau électrique ?</i>	38
2.7. <i>Comment s'effectuent l'entretien et la maintenance des éoliennes en mer ?</i> ...	40
2.8. <i>Comment est gérée la sécurité au sein des parcs ?</i>	42
2.9. <i>Que se passe-t-il à la fin de la période d'exploitation d'un parc éolien en mer ?</i> ..	43
2.10. <i>Comment les composants des parcs éoliens en mer sont-ils recyclés ?</i>	44
CHAPITRE 3.	
QUELLES SONT LES INTERACTIONS ENTRE L'ÉOLIEN EN MER ET L'ENVIRONNEMENT ?	47
3.1. <i>Comment sont étudiés les potentiels impacts d'un parc éolien en mer sur l'environnement ?</i>	50
3.2. <i>Quels sont les effets observés sur la biodiversité marine ?</i>	52

3.3.	Comment les éoliennes en mer cohabitent-elles avec les oiseaux et les chauves-souris ?	54
3.4.	Quels types de voisinage entre les dauphins et autres mammifères marins avec les éoliennes ? Quelles sont les mesures prises ?	56
3.5.	Quels peuvent être les effets sur les poissons, mollusques et crustacés ? Quelles sont les mesures prises ?	58
3.6.	Les parcs peuvent-ils avoir des effets sur les sols marins et les espèces qui y vivent ?	60
3.7.	Quels peuvent être les effets sur la turbidité, la qualité de l'eau, la qualité des sédiments ?	61
3.8.	L'installation d'éoliennes en mer est-elle ou sera-t-elle possible en zone protégée ?	62
3.9.	Quelles sont les mesures prises pour éviter les risques de pollution du milieu marin ?	64
3.10.	Comment s'organise le démantèlement d'un parc éolien en mer ?	66
3.11.	Y a-t-il des effets liés au cumul de plusieurs projets dans une même région ? ..	67
CHAPITRE 4.		
	COMMENT LES PARCS ÉOLIENS COHABITENT-ILS AVEC LES AUTRES ACTIVITÉS EN MER ?	69
4.1.	Les éoliennes sont-elles visibles ou audibles depuis la côte ?	71
4.2.	Est-il possible de naviguer au sein d'un parc ?	72
4.3.	Les parcs éoliens ont-ils un impact sur les radars de surveillance maritime et de navigation ?	73
4.4.	Quelles sont les règles de balisage aéronautique et maritime pour les parcs éoliens ?	74
4.5.	Comment les parcs éoliens en mer cohabitent-ils avec les activités de pêche professionnelle ?	76
4.6.	Comment les professionnels de la pêche sont-ils associés à la réalisation des parcs ?	78
4.7.	Les parcs éoliens en mer ont-ils un impact sur le tourisme ?	79
CHAPITRE 5.		
	QUELS SONT LES ENJEUX SOCIO-ÉCONOMIQUES DE L'ÉOLIEN EN MER ?	81
5.1.	Les composants des parcs éoliens en mer sont-ils fabriqués en France ?	82
5.2.	Combien l'éolien en mer crée-t-il d'emplois ?	84
5.3.	Quel est le coût d'un parc éolien en mer et qui le finance ?	86
5.4.	Combien coûte l'électricité produite par un parc éolien en mer ?	87
5.5.	Pourquoi et comment les pouvoirs publics soutiennent-ils les projets éoliens en mer ?	88
5.6.	Quels sont les bénéfices économiques pour les communes et acteurs locaux ? ..	90



INTRODUCTION

Qu'est-ce qu'une éolienne en mer ?

Les principaux éléments constitutifs d'une éolienne en mer

Le rotor et ses pales :

ils permettent de capter le vent.

La nacelle :

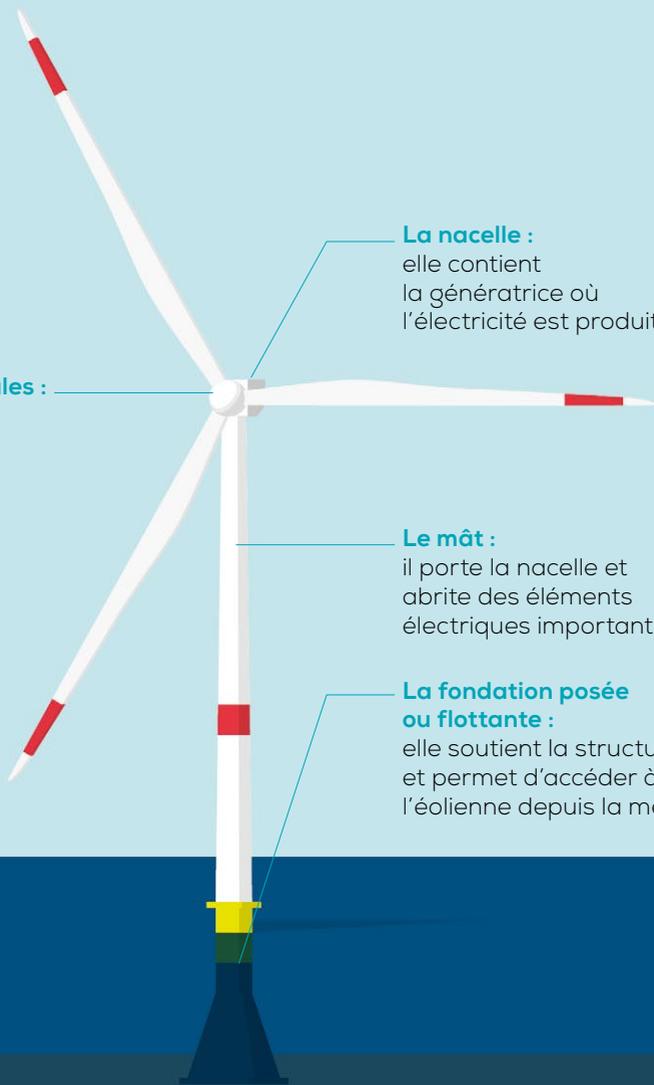
elle contient la génératrice où l'électricité est produite.

Le mât :

il porte la nacelle et abrite des éléments électriques importants.

La fondation posée ou flottante :

elle soutient la structure et permet d'accéder à l'éolienne depuis la mer.



L'installation d'éoliennes en mer permet de disposer d'installations de production d'électricité non carbonée particulièrement puissantes. En effet, la puissance d'une éolienne dépend essentiellement de sa taille – plus l'éolienne est grande, plus sa puissance est élevée et plus elle produit d'électricité – et le milieu marin permet d'installer des éoliennes plus hautes qu'à terre les rendant ainsi plus puissantes. Par ailleurs, les parcs éoliens marins bénéficient, également, de régimes de vent plus réguliers et, souvent, plus forts.

Chaque année, les technologies progressent pour proposer sur le marché des équipements plus performants. De ce fait, pour un nombre réduit d'éoliennes installées, la puissance générée est plus importante. Les derniers parcs, en construction aujourd'hui, représentent une puissance d'environ 500MW, quand les nouveaux projets s'établissent entre 1000 et 2000MW.

Taille des éoliennes en mer au fil des avancées technologiques

Source : Agence Internationale de l'énergie (AIE)



* Année annoncée/envisagée pour le déploiement commercial.

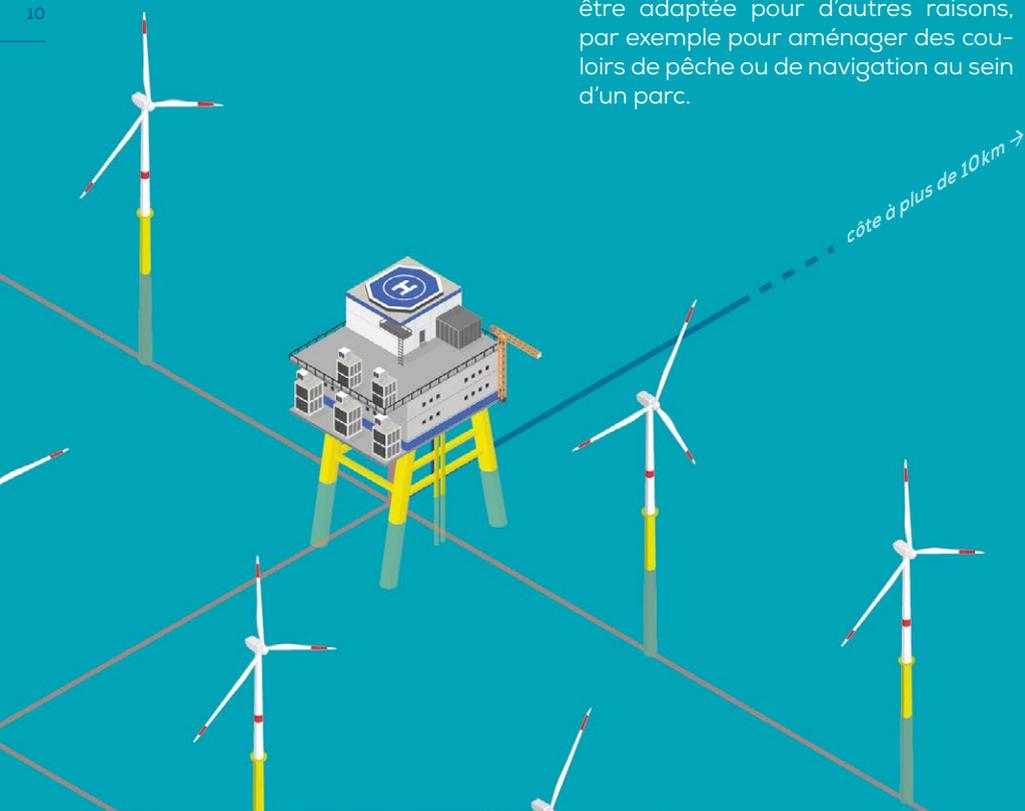
** D'autres améliorations technologiques d'ici 2030 permettraient le développement d'éoliennes plus grandes produisant 15 à 20 MW.

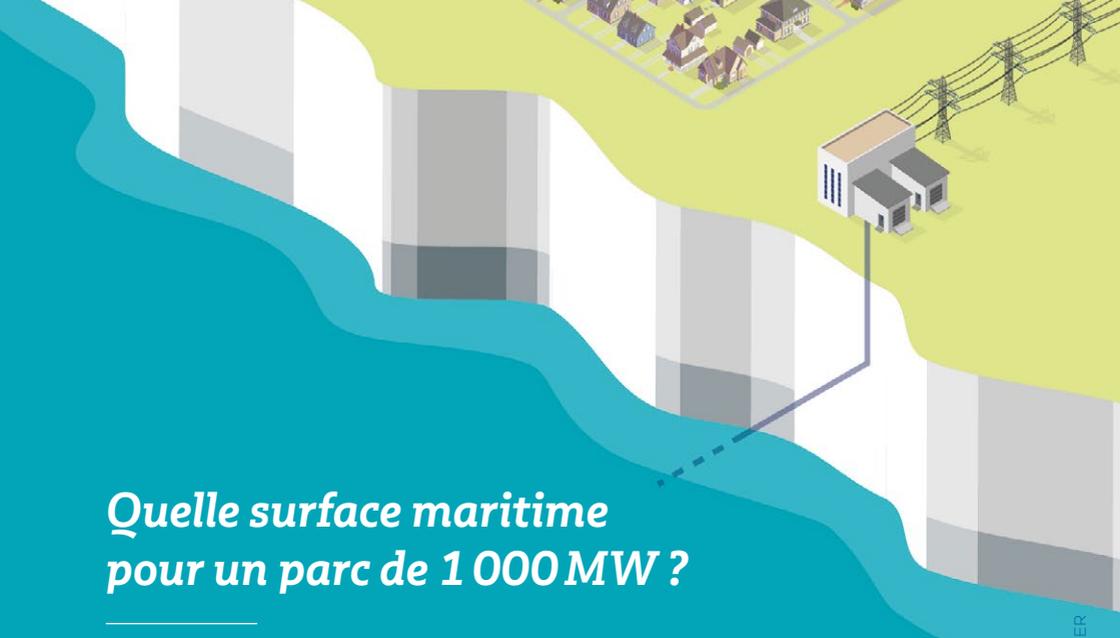
Qu'est-ce qu'un parc éolien en mer ?

Un parc éolien en mer est un ensemble d'éoliennes implantées au large des côtes et produisant de l'électricité acheminée par des câbles sous-marins jusqu'à une sous-station électrique raccordée au réseau via des câbles.

Il est généralement constitué de plusieurs dizaines d'éoliennes, suffisamment éloignées les unes des autres pour éviter les effets de turbulence d'une éolienne sur l'autre. En effet, les turbulences rendent plus difficile la récupération de l'énergie du vent et affaiblissent les performances et les composants mécaniques de la machine, ce qui réduit la capacité de production d'électricité.

L'espacement entre les éoliennes s'établit en général à six ou sept fois la largeur du rotor soit, pour les éoliennes de grande taille, des distances de l'ordre d'un kilomètre. La distance entre les éoliennes peut également être adaptée pour d'autres raisons, par exemple pour aménager des couloirs de pêche ou de navigation au sein d'un parc.





Quelle surface maritime pour un parc de 1 000 MW ?

Quelle que soit la taille et la puissance des éoliennes, une surface minimale d'environ 100 à 150 km² est requise pour installer un parc de 1 000 MW. La puissance des machines a peu d'incidence sur la surface nécessaire car, plus les éoliennes sont puissantes, plus il faut les écarter les unes des autres afin d'éviter toute turbulence dans la captation du vent.

L'Etat prévoit d'atteindre une capacité installée d'au moins 45 GW en 2050, ce qui représente environ 1,5% de notre surface maritime métropolitaine, en coactivité avec d'autres usages de la mer.

À TITRE D'EXEMPLE

L'un des plus grands parcs éoliens du Royaume-Uni est le London Array. Les 175 éoliennes de sa phase 1 installées en 2013, réparties sur une surface de 100 km², représentent une puissance de 630 MW, à 22 km des côtes.

Le parc de Saint-Nazaire, dont la capacité installée est de 480 MW avec 80 éoliennes occupe une zone d'environ 78 km² située entre 12 et 20 km des côtes.

BON À SAVOIR

Le premier parc éolien en mer au monde a été installé au large du Danemark en 1991. Nommé Vindeby, il comptait alors 11 éoliennes de 0,45 MW chacune. Il a été démantelé en 2017.



Quelles différences entre un parc éolien flottant et un parc éolien posé ?

LA PROFONDEUR D'INSTALLATION

Contrairement aux idées reçues, la différence entre le posé et le flottant n'est pas une question de distance à la côte, mais une question de profondeur. En effet, les éoliennes posées sont installées sur des fondations construites sur le fond marin tandis que les éoliennes flottantes le sont sur des structures flottantes, reliées et ancrées au fond par des lignes d'ancrage.

- ▶ Les fondations posées permettent l'installation d'éoliennes jusqu'à des profondeurs de 50 à 60 mètres.
- ▶ Les fondations flottantes rendent possible l'installation d'éoliennes à des profondeurs bien plus importantes, jusqu'à 800 mètres. Cette technologie permet d'utiliser des gisements de vent jusque-là inexploitable, notamment en Méditerranée.

LES MÉTHODES DE CONSTRUCTION ET D'INSTALLATION

Les parcs éoliens en mer posés et flottants ne font pas appel aux mêmes moyens de construction et d'installation :

- ▶ l'installation des éoliennes posées se fait en grande partie en mer. Depuis de grands navires et barges autoélévatrices, les fondations, puis les éoliennes sont installées directement sur la zone du parc ;
- ▶ l'assemblage des éoliennes flottantes avec leur fondation peut, en revanche, s'effectuer à terre, dans un port, avant de faire appel à des navires pour les remorquer sur leur zone d'implantation.

LES CÂBLES UTILISÉS

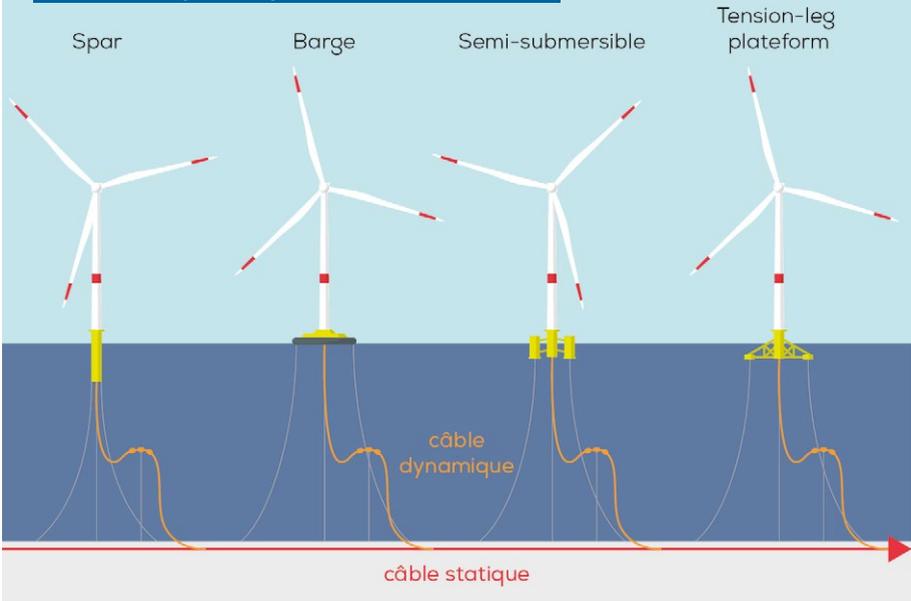
Les câbles électriques pour raccorder les éoliennes entre elles et jusqu'au poste électrique en mer sont également différents dans le cas de parcs éoliens flottants, pour lesquels des câbles dynamiques¹ sont utilisés.

LES ÉOLIENNES FLOTTANTES VONT-ELLES REMPLACER LES ÉOLIENNES POSÉES ?

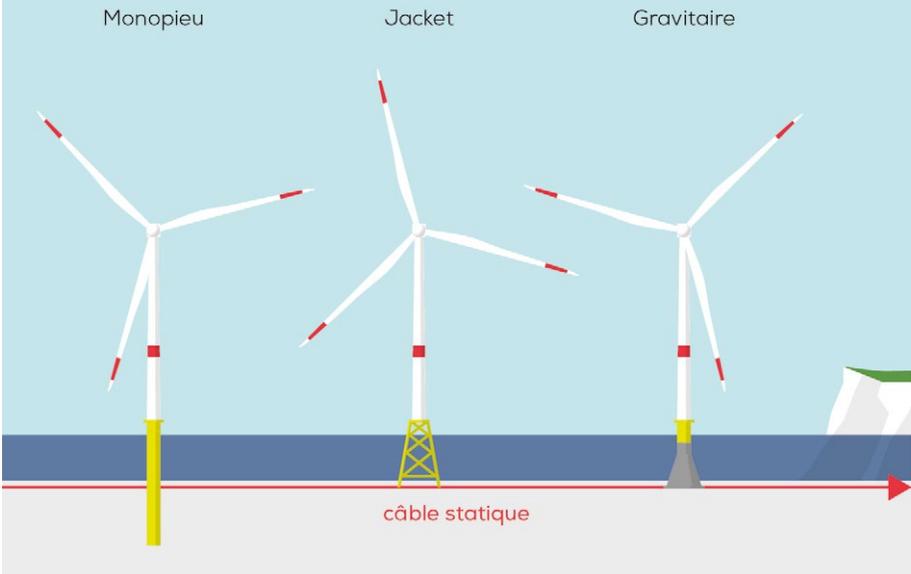
Les fondations flottantes permettent d'installer des éoliennes dans des zones plus profondes qu'avec la technologie posée. Chaque géographie sous-marine peut ainsi trouver la solution la plus adaptée pour exploiter son potentiel de vent. Les deux options sont donc complémentaires !

1. Les « câbles dynamiques » permettent le transport de l'énergie produite du système flottant (éolien flottant, houlomoteur et hydrolien) jusqu'aux fonds marins où sont installés des câbles électriques statiques sous-marins.

Installations pour un parc éolien en mer flottant



Installations pour un parc éolien en mer posé



Une éolienne en mer produit-elle de l'électricité en permanence ?

Une éolienne en mer commence à tourner et produire de l'électricité dès que le vent atteint une vitesse d'environ 10 km/h. L'éolienne fonctionne à sa puissance optimale lorsque la vitesse du vent est comprise entre 45 km/h et 110 km/h environ. Au-delà, afin d'éviter de l'endommager, l'éolienne est arrêtée et placée en position « de drapeau ». Dans cette position, les machines peuvent résister aux tempêtes, puis reprendre leur rotation.

90% DU TEMPS

un parc éolien marin produit de l'électricité mais, selon les conditions de vent et les aléas météorologiques, pas toujours à pleine puissance. Comme la météo, la production éolienne est prévisible, mais variable.

En moyenne, un parc de **500 MW** peut produire environ **1,8 à 2 TWh par an**, ce qui permet d'alimenter l'équivalent de **350 000 foyers** en électricité.

À titre d'exemple, **les 80 éoliennes** du parc de Saint-Nazaire, d'une puissance totale de **480 MW** produisent l'équivalent de **20% de la consommation annuelle** d'électricité de la Loire-Atlantique.

FACTEUR DE CHARGE

Pour exprimer la relation entre la capacité d'un parc (en MW) et sa production (en MWh), on parle de facteur de charge car les éoliennes, comme tout équipement de production d'électricité, ne fonctionnent pas constamment à 100% de leur capacité. Si les facteurs de charge des éoliennes terrestres sont de l'ordre de 20 à 30%, en mer ils atteignent 40 à 50% grâce aux vents marins plus fréquents, plus puissants et plus constants.

POUR INFO !

Pour l'éolien en mer, la mesure du vent s'effectue à 100m de hauteur. On considère qu'il existe un potentiel éolien en mer dès lors que le vent atteint en moyenne 25km/h. En France métropolitaine, 93,2% de notre espace maritime à moins de 200km des côtes dispose d'une ressource en vent supérieur à 25,2km/h à 150m au-dessus du niveau moyen de la mer.

Comme le démontrent les scénarios RTE, l'éolien en mer est une technologie de forte puissance, quasi équivalente au nucléaire et donc complémentaire pour atteindre nos objectifs de décarbonation.

Comparatif éolien en mer / nucléaire



Parc éolien en mer
1000 MW



Facteur de charge **40%**



3,5 TWh/an
production



700 000 foyers/an
alimentés



Centrale nucléaire
950 MW



Facteur de charge **75%**



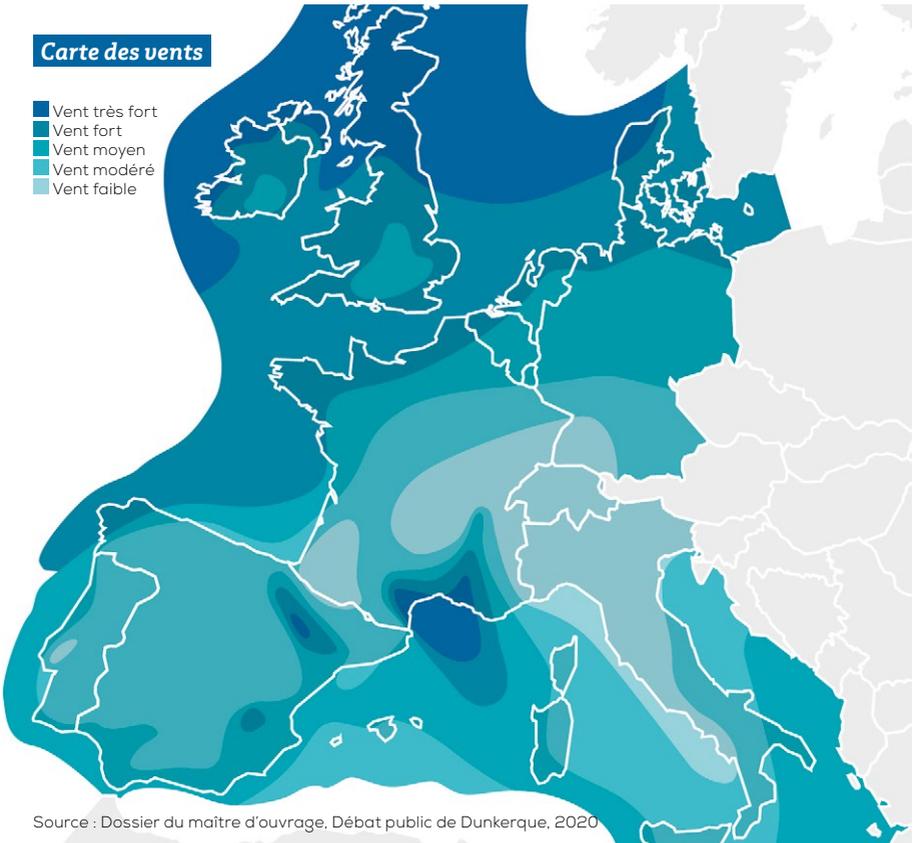
6 TWh/an
production



1,2 million foyers/an
alimentés

Carte des vents

- Vent très fort
- Vent fort
- Vent moyen
- Vent modéré
- Vent faible



Source : Dossier du maître d'ouvrage, Débat public de Dunkerque, 2020

L'éolien en mer : une énergie intermittente ?

La production d'énergie éolienne est parfois qualifiée d'intermittente : elle est en réalité variable. En effet, l'intermittence peut être comparée à un interrupteur, dont la position « marche/arrêt » changerait subitement sans prévenir, à l'instar d'une connexion téléphonique sur une route de montagne où le réseau est tantôt bon, tantôt inexistant. Or, les parcs éoliens ne cessent pas de fonctionner brutalement, en fonction des conditions météorologiques, passant d'un maximum de production à un arrêt soudain, mais de manière progressive et prévisible. C'est encore plus vrai lorsque l'on ne se concentre pas sur un seul site et que l'on considère l'ensemble du parc de production, où le foisonnement des installations lisse les courbes de production.

Quatre éléments clés permettent de gérer la variabilité de la production éolienne à l'échelle nationale :

► **la prévision** : grâce aux outils de prédiction météorologique permettant d'anticiper précisément la production du parc français plusieurs jours à l'avance.

► **la complémentarité** : le système électrique repose sur des sources d'énergies diverses et complémentaires – solaire photovoltaïque, éolien terrestre, hydroélectricité, biomasse, etc. – permettant de parer à d'éventuelles indisponibilités d'une source ou d'une autre.

► **le foisonnement** : comme la France a la particularité géographique d'être exposée à plusieurs régimes de vent, indépendants les uns des autres, répartir les installations éoliennes à terre ou en mer dans différentes régions garantit un minimum de production d'électricité éolienne à tout moment.

► **l'adaptabilité du système électrique** : des moyens de stockage, hydrauliques ou batteries, ou des effacements de consommation industriels, permettent d'ajuster le niveau de consommation à la production mais aussi le niveau de production aux estimations de consommation et à la consommation réelle : c'est ce qu'on appelle l'équilibre de l'offre et de la demande. Lorsque la production est élevée, des signaux sont envoyés pour stocker l'énergie qui est restituée lorsque la production est plus faible.

Qui intervient sur un parc éolien en mer ?

Le développement de l'éolien en mer résulte d'une politique publique et s'effectue sur le domaine de l'État (Domaine Public Maritime – DPM et/ou Zone Économique Exclusive – ZEE). Le développement des projets est donc, à chaque étape, en forte interaction avec les pouvoirs publics.

Les acteurs intervenant sur un parc éolien en mer

ACTEURS PUBLICS	ACTEURS PRIVÉS
État (central et déconcentré)	Énergéticiens et Porteurs de projets
Régions	Bureaux d'études (techniques, environnementales, juridiques)
UE et Commission européenne	Financeurs et Assureurs
Commission de régulation de l'énergie (CRE)	Fournisseurs et Sous-traitants
RTE	Exploitants

Les catégories de métiers et les équipes qui interviennent sont très nombreuses et diverses.

En France, on dénombrait en 2023 **plus de 8300 emplois ETP** (équivalent temps plein) dans ce secteur énergétique.



CHAPITRE 1.

POURQUOI EST-IL ESSENTIEL DE DÉVELOPPER L'ÉOLIEN EN MER ?

L'énergie du vent, abondamment disponible au large des côtes françaises, est inépuisable et prévisible. **Notre pays possède le deuxième espace maritime au monde** derrière les États-Unis, et une ressource en vent qui lui offre le deuxième potentiel de développement de l'éolien en mer d'Europe après le Royaume-Uni. Ce gisement métropolitain est composé de trois régimes de vent : façade Manche-Mer du Nord, front Atlantique et zone Méditerranée.

Face à la triple urgence à laquelle nous sommes confrontés – sécuriser et renforcer notre souveraineté énergétique sur toute la chaîne de valeur tout en réduisant nos émissions de CO₂ et en maintenant une énergie abordable pour les Français – l'éolien en mer doit jouer un rôle majeur. En effet, il permet de développer de nouvelles capacités de production d'électricité, avec des parcs de forte puissance, de l'ordre de 1000 à 2000MW, voire plus encore, et de **contribuer à hauteur de 25 à 30% de la production électrique française en 2050**. À titre d'exemple, au cours du mois de janvier 2023, le premier parc en mer installé en France au large de Saint-Nazaire a produit plus de 180 000 MWh, soit l'équivalent de la consommation de près de 850 000 personnes.

L'expertise française en matière énergétique et maritime est reconnue dans le monde entier. Notre pays dispose notamment de capacités portuaires particulièrement adaptées à la construction d'infrastructures dédiées à cette activité, de plusieurs usines de construction d'éoliennes en mer ainsi que d'un réseau de transport d'électricité (géré par RTE) bien maillé, dont la capacité était suffisante pour accueillir les premiers parcs. Néanmoins, la « grande bascule » du mix énergétique dans les années à venir va nécessiter un redimensionnement profond des réseaux électriques.²

Pour atteindre la neutralité carbone en 2050 et réduire les émissions nettes de gaz à effet de serre d'au moins 55% d'ici à 2030, objectifs que la France et l'Union européenne se sont fixés, **l'éolien en mer, en complémentarité avec les autres énergies renouvelables, constitue une source d'énergie essentielle** permettant d'injecter abondamment et régulièrement une électricité décarbonée sur notre réseau électrique.

Les scénarios et analyses réalisés par l'État, l'ADEME ou RTE l'affirment : 22 000 à 62 000 MW d'énergie éolienne en mer devront être raccordés au réseau pour que la France atteigne la neutralité carbone en 2050. Le développement de capacités éoliennes en mer est donc essentiel. Compte-tenu de l'envergure et de la durée nécessaire à la réalisation des parcs et de leur raccordement, il faut les anticiper dès maintenant. D'où l'importance de **la planification spatiale maritime qui pose un premier jalon de 18 000 MW d'ici 2035**.

1.1.

Quelle est la situation de l'éolien en mer en Europe et dans le monde ?



64 300 MW

PUISSANCE CUMULÉE DU PARC ÉOLIEN EN MER MONDIAL FIN 2022, un quasi doublement en deux ans (32 500 MW en 2020)



L'Europe, où s'est historiquement développée la filière, accueille près de la moitié du parc mondial

30 000 MW

DE PUISSANCE

installée fin 2022

5 954

ÉOLIENNES

connectées au réseau en Europe³

Le Royaume-Uni représente aujourd'hui 44% de la puissance installée en Europe. Avec l'Allemagne, le Danemark, les Pays-Bas et la Belgique, ces cinq pays possèdent près de 95% du parc européen installé.

480 MW

CAPACITÉ DU PARC ÉOLIEN EN MER

FRANÇAIS FIN 2022⁴

8 300 ETP

NOMBRE D'EMPLOIS DANS LE SECTEUR DES ÉNERGIES MARINES RENOUVELABLES EN FRANCE EN 2023⁵



3. Source : Statistique 2022 de l'éolien en mer en Europe - Wind Europe.

4. Source : Panorama de l'électricité renouvelable 2022.

5. Équivalent Temps Plein (ETP). Source : Rapport 2024 de l'observatoire des énergies de la mer.

Quelles perspectives pour l'éolien en mer ?

Le marché mondial de l'éolien en mer est très dynamique. Il a progressé de 24 % par an en moyenne depuis 10 ans.

DANS LE MONDE

D'ici 2030, les capacités installées dans le monde devraient atteindre 234 000 MW. Le potentiel de l'éolien en mer est « quasi illimité » selon l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) qui a publié fin 2019, un rapport fondé sur une analyse géospatiale au niveau mondial.

L'AIE estime que la production d'énergie éolienne en mer devrait voir ses capacités de production multipliées par 15 d'ici à 2040, contribuant largement à décarboner l'économie mondiale.

EN EUROPE

Dans l'Union européenne, la puissance des parcs s'élève aujourd'hui à 30 000 MW. Elle devrait atteindre 130 000 MW d'ici 2040, selon l'AIE, faisant de l'éolien en mer la première source d'électricité européenne.

L'Europe a inscrit, dans sa stratégie de neutralité carbone, **un objectif de 450 000 MW (option haute) installés en mer en 2050**. Compte tenu des différents engagements pris par les pays européens, 15 000 MW par an pourraient être implantés jusqu'en 2030.

EN FRANCE

En France, le potentiel technique théorique estimé pour l'éolien en mer est de quelque 220 000 MW, 80 000 MW pour l'éolien posé, répartis sur une superficie de 10 000 km² et 140 000 MW pour l'éolien flottant, moins dépendant de la profondeur marine et de la distance à la côte, répartis sur une superficie de 25 000 km².

Sur les 450 000 MW visés par l'Union européenne à l'horizon 2050, **WindEurope considère que la France pourrait contribuer à hauteur de 57 000 MW.**

**Potentiel technique théorique
estimé pour l'éolien en mer
en France**

Source : Agence Internationale de l'énergie (AIE)

80 000 MW
Éolien en
mer posé

140 000 MW
Éolien en
mer flottant



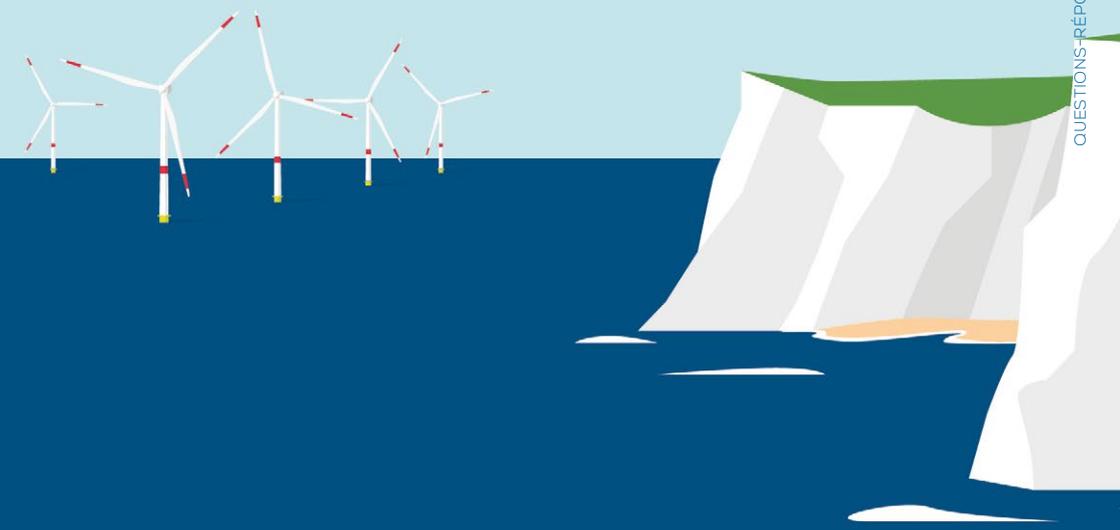
QUEL DÉVELOPPEMENT DE L'ÉOLIEN EN MER EN FRANCE AUJOURD'HUI ?

Jusqu'en novembre 2022, date de la mise en service du premier parc éolien français au large de Saint-Nazaire, une seule éolienne fonctionnait au large des côtes françaises : il s'agissait d'une éolienne flottante de 2 MW, installée en 2018 sur le site d'essai Sem-Rev, au large du Croisic.⁶

La France compte, en 2023, **quinze projets de parcs** :

- ▶ Trois parcs sont en construction (au large de Saint-Brieuc, Fécamp et Courseulles-sur-Mer). Leur mise en service est prévue entre 2023 et 2025. En juillet 2023, les premières éoliennes du parc de Saint-Brieuc ont commencé à injecter leur électricité sur le réseau ;
- ▶ Deux parcs sont autorisés au large de Dieppe-Le Tréport et de Yeu-Noirmoutier – leur mise en service est prévue à l'horizon 2026 ;
- ▶ Un parc est en cours d'autorisation au large de Dunkerque et devrait être mis en service à partir de 2028 ; un autre au large de la Normandie - Centre Manche 1 - devrait être opérationnel en 2031 ;
- ▶ Cinq autres parcs font l'objet de procédures d'appels d'offres en Méditerranée, en Bretagne Sud, en Centre Manche et en Sud Atlantique ;
- ▶ Trois fermes pilotes pour l'éolien flottant en Méditerranée sont en cours de construction.

Ces parcs porteront la capacité totale installée de la France à 7,5GW.



6. L'éolien en mer a représenté 1,9TWh sur l'année 2023, contre 0,6 TWh en 2022 (Source : RTE)

Carte des projets éoliens en mer en France



- En service
- En construction
- Attribué, en cours d'autorisation
- Appel d'offre en cours
- Éolien en mer posé
- Éolien en mer flottant

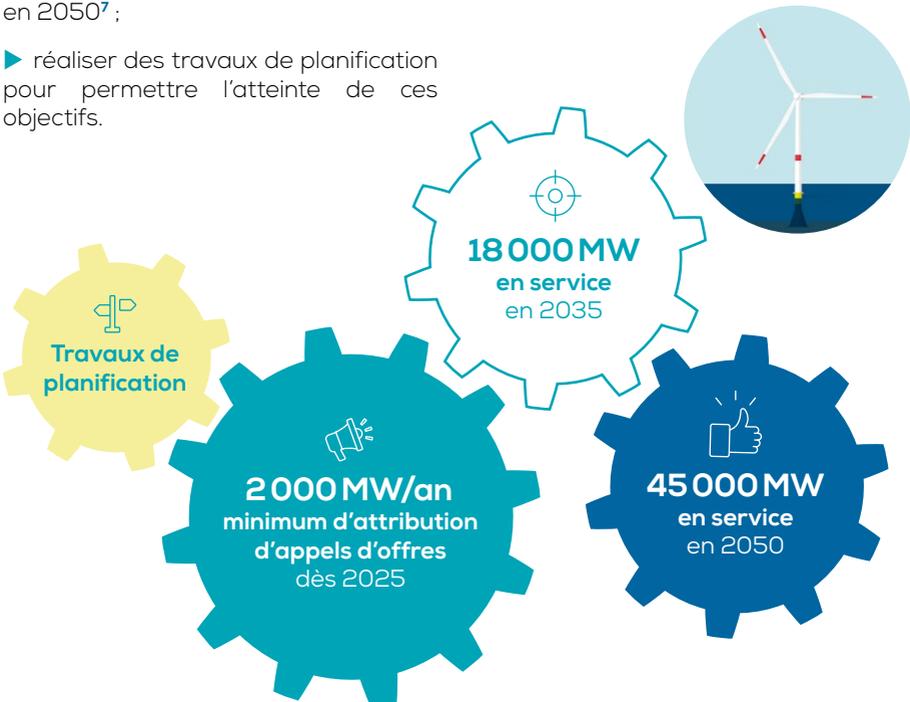
1.3.

Quelles perspectives pour la filière française ?

Avec le Pacte pour l'éolien en mer signé en mars 2022, l'État a donné une vision à la filière et une impulsion puissante au développement de l'énergie éolienne en mer.

Il s'est engagé à :

- ▶ viser un volume minimal d'attribution d'appels d'offres de 2000MW/an pour l'éolien en mer dès 2025 ;
- ▶ dans cette dynamique, fixer l'objectif de 20000MW attribués en 2030 pour atteindre une capacité de 18000MW en service en 2035 et de 45000MW en 2050⁷ ;
- ▶ réaliser des travaux de planification pour permettre l'atteinte de ces objectifs.



7. L'objectif initial de 40000MW a depuis été revu à la hausse pour atteindre 45000MW (cf. discours du Président de la République en novembre 2023).



CHAPITRE 2.

L'ÉOLIEN EN MER : COMMENT SE CONSTRUIT ET COMMENT FONCTIONNE UN PARC ?

2.1.

Quelles sont les principales étapes d'un projet éolien en mer ?

Développement et financement

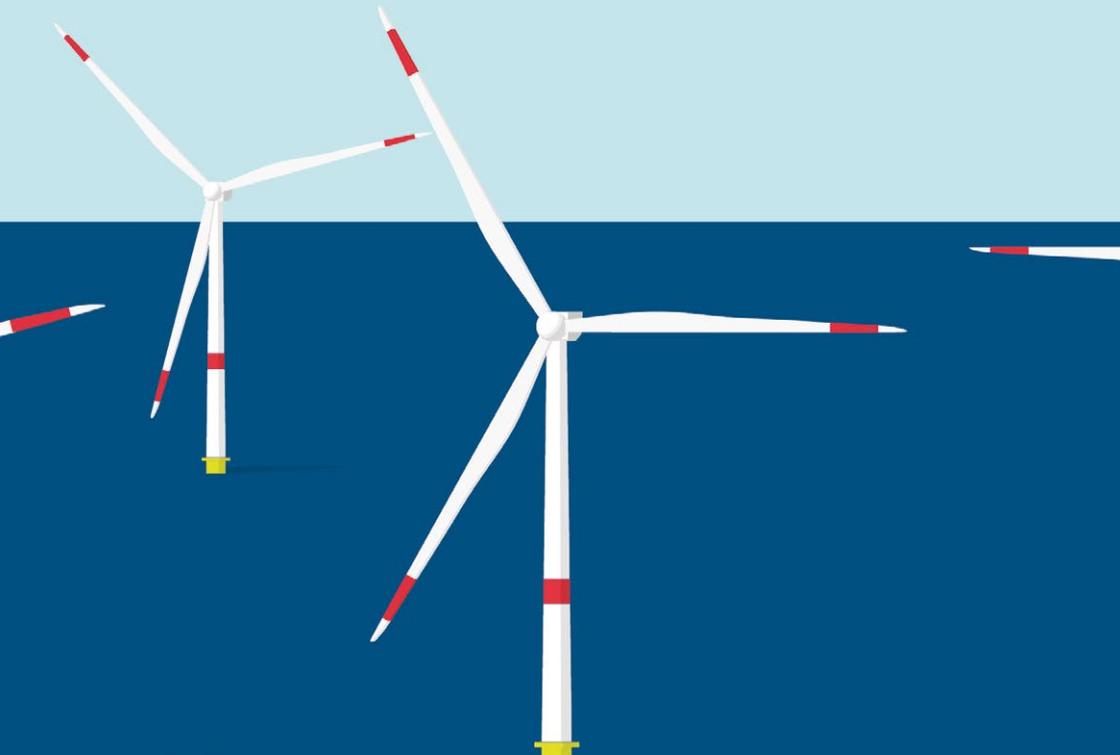
5 à 7 ans

- Choix de la zone
- Consultation du public
- Études du site
- Mise en concurrence
- Conception du projet
- Autorisations administratives

Construction et mise en service

3 à 6 ans

- Fabrication des composants
- Assemblage et installation des éoliennes
- Mise en place du poste électrique et des câbles en mer
- Raccordement à terre



Exploitation et maintenance

25 à 35 ans

- Production d'énergie renouvelable
- Maintenance et sécurisation du parc et du raccordement

Démantèlement

2 à 3 ans

- Démontage des infrastructures en mer
- Remise en état du site
- Prise en charge des composants et valorisation



Comment et par qui les zones des projets éoliens en mer sont-elles choisies ?

L'espace maritime est un domaine public qui appartient à l'État ou sur lequel il a des droits exclusifs, comme c'est le cas de la Zone Économique Exclusive. L'allocation de l'espace en mer pour l'installation de parcs éoliens est donc décidée par l'État.

Pour cela, il s'appuie sur différents travaux de concertation menés avec le public et les usagers du milieu de la mer au sein de différentes instances comme les Conseils maritimes de façade⁸.

Au sein de cette instance ont été préparés les Documents Stratégiques de Façade (publiés en 2019) qui définissent, pour l'éolien en mer comme pour les autres activités maritimes, des zones où chaque activité a vocation à se développer. Il s'agit de garantir la compatibilité de toutes avec le respect de l'environnement.

Ces documents ont fait apparaître de larges zones sur lesquelles le développement de l'éolien en mer était possible. Au sein de ces zones, des espaces plus restreints sont ensuite définis, puis soumis à la consultation du public avant le lancement des appels d'offres.

Pour chaque appel d'offres, la Commission Nationale du Débat Public (CNDP) est saisie afin d'organiser la participation du public.

Depuis la loi de 2018 pour un État au service d'une société de confiance (dite loi ESSOC), la saisine de la CNDP est effectuée par l'État en amont de la procédure de mise en concurrence qui désignera le développeur éolien chargé de construire, d'exploiter et de démanteler le parc. Le public est ainsi associé au plus tôt dans la définition des projets, notamment pour éclairer la décision relative à la localisation du parc et à son raccordement en mer.

La loi d'accélération et de simplification de l'action publique (ASAP) du 7 décembre 2020 prévoit la possibilité que les débats publics portent sur le développement de plusieurs projets sur une même façade maritime, durant plusieurs années.

8. Le conseil maritime de façade est une instance de concertation en charge de l'utilisation, l'aménagement, la protection et la mise en valeur des littoraux et de la mer.

Après cette première étape, l'appel d'offres est lancé par l'État, via la Commission de Régulation de l'Énergie (CRE).

Une fois le lauréat sélectionné à l'issue du processus d'appel d'offres, commencent pour lui de nouvelles étapes pour préparer les demandes d'autorisations et les enquêtes publiques. Une phase de concertation avec RTE, qui raccordera les parcs, a lieu en parallèle pour définir le tracé des lignes qui amèneront le courant jusqu'au poste à terre. L'ensemble de cette étape peut prendre jusqu'à trois ans.

Viennent ensuite le montage du financement et la recherche des contrats industriels, qui seront conclus dès la décision finale d'investissement. Cette étape dure entre trois et six ans. Enfin, les chantiers à terre et en mer débutent pour une durée de l'ordre de deux ans.

En parallèle s'effectuent les études détaillées, la fabrication des composants, les travaux terrestres et maritimes. Pendant cette période, RTE réalise le raccordement ; la mise en service du parc intervient dans la foulée, voire l'année suivante, en fonction de la météo.

RÉCAPITULATIF : LES ÉTAPES DEPUIS LE CHOIX DU SITE JUSQU'À LA VIE D'UN PARC ÉOLIEN EN MER (EN DURÉE CUMULÉE DE 7 À 10 ANS)

- ▶ L'État recherche des zones où pourraient s'installer des éoliennes en mer dans le cadre d'une planification spatiale maritime.
- ▶ Il mène des études préliminaires avec RTE pour le raccordement.
- ▶ Il confie un débat public à la CNDP avec les citoyens sur la ou les zone(s) envisagées.
- ▶ La CNDP organise le débat, ouvert à tous, qui dure près d'un an.
- ▶ L'État décide des zones en tenant compte des apports du débat.
- ▶ Puis, l'État lance l'appel d'offres pour la réalisation du ou des parcs.
- ▶ Toute entreprise peut y répondre en s'appuyant sur les études préalables de l'État et les observations du débat public.
- ▶ Un candidat est retenu et lance l'étude d'impact et l'enquête publique afin d'obtenir les autorisations auprès des services de l'État (comme l'autorisation environnementale, par exemple).

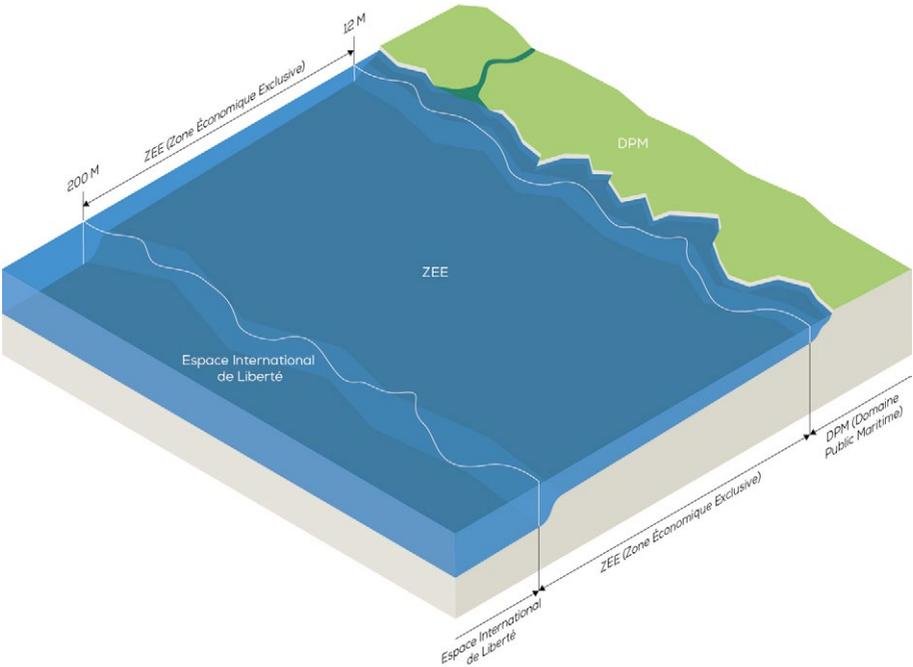
2.3.

Comment le développement de l'éolien en mer est-il réglementé ?

Le développement de l'éolien en mer est réglementé par le code de l'énergie et par le code de l'environnement. Ainsi, un projet doit obtenir plusieurs autorisations selon qu'il est situé sur le domaine public maritime (DPM) ou sur une zone économique exclusive (ZEE).

Droit maritime : plusieurs zones et plusieurs juridictions

1 mile marin (M) = 1852 mètres



Sur le domaine public maritime, les lauréats de l'appel d'offres, maîtres d'ouvrage du projet, doivent obtenir deux autorisations principales auprès du préfet de Région :

- ▶ la concession d'utilisation du domaine public maritime ;
- ▶ l'autorisation environnementale.

RTE doit aussi, en plus de ces deux autorisations pour la partie raccordement, demander une DUP pour la liaison sous-marine du futur parc.

Sur la zone économique exclusive, le maître d'ouvrage doit obtenir une autorisation unique auprès du préfet maritime de façade, de même que RTE pour le poste en mer (ainsi qu'un agrément pour l'installation des liaisons sous-marines).

Les maîtres d'ouvrages et le gestionnaire du réseau de transport d'électricité réalisent une étude d'impact environnemental pour décrire l'état initial du site, évaluer les impacts du projet et présenter les mesures environnementales de gestion et/ou de mitigation proposées, liées à son déploiement.

Le bilan et le compte rendu des concertations (débat public et concertation sous l'égide du garant⁹) sont joints aux dossiers d'enquête publique, tout comme l'ensemble de l'étude d'impact. Ces documents sont consultables par le public lors de la période d'enquête publique.

À NOTER

Depuis 2018, le gouvernement a mis en place un dispositif d'autorisations à caractéristiques variables, appelé « permis enveloppe ». Grâce à ce dispositif, le nombre d'éoliennes et le choix de la puissance de la turbine n'est pas figé, ce qui permet, le cas échéant, au maître d'ouvrage d'opter pour la technologie la plus pertinente au moment de la construction du parc.¹⁰

9. Il s'agit d'un tiers désigné par la Commission Nationale du Débat Public.
10. Le « permis enveloppe » doit cependant être pris en compte et évalué dans l'étude d'impact par le porteur de projet.

Qui fabrique et assemble les éoliennes en mer ?

Les éoliennes sont fabriquées par des entreprises, dont certaines réalisent également des éoliennes terrestres, et qui disposent d'expérience dans le secteur de la production électrique (turbine à gaz, turbine hydroélectrique...).

Les turbines et les pales sont réalisées par des entreprises spécialisées telles que General Electric, Siemens Gamesa, Vestas, LM Wind, etc.

Les usines de fabrication et d'assemblage se situent souvent à proximité des ports. C'est le cas, par exemple, de General Electric à Montoir de Bretagne, près de Saint-Nazaire ou de Siemens Gamesa au Havre. Un tiers des usines européennes de fabrication d'éoliennes en mer se trouve en France.

Les fondations de type posé ou flottant sont réalisées par des entreprises spécialisées en architecture navale, disposant d'une expertise du béton et de l'acier.

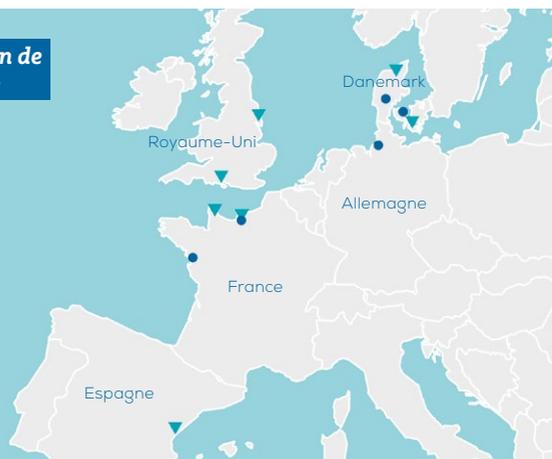
L'assemblage des éoliennes est effectué par des constructeurs et des sociétés spécialisées et se déroule en partie sur le port ou à la sortie des usines avant d'être finalisé en mer.

Cette étape répond à des normes définies au niveau international qui s'appliquent en France comme la norme ISO 29400 de 2015, Navires et technologie maritime – Énergie éolienne offshore – Opérations portuaires et maritimes.

Cette norme vise à garantir la sécurité et l'accessibilité des sites. Elle fournit un ensemble complet d'exigences et de lignes directrices pour la planification et l'ingénierie des opérations portuaires et maritimes, couvrant l'ensemble de la documentation et des travaux associés à l'installation et à l'entretien des parcs éoliens en mer. Cela concerne notamment la conception et l'analyse des composants, des systèmes, des équipements et des procédures nécessaires à la réalisation des opérations portuaires et maritimes, ainsi que les méthodes et les procédures définies pour un déploiement en toute sécurité.

Carte des usines de production de pales et de nacelles en Europe

- usine de production de nacelles
- ▼ usine de production de pales



QUELS SONT LES MATÉRIAUX QUI ENTRENT DANS LA FABRICATION D'UNE ÉOLIENNE EN MER ?

La nacelle, le rotor et le mât des éoliennes sont majoritairement composés d'**acier**. Les fondations des éoliennes posées sont, selon leurs technologies, composées de **béton** (fondation gravitaire) ou d'**acier** (fondations jacket ou monopieux). Il en est de même pour les fondations de l'éolien flottant.

Les pales sont, comme les coques de voiliers, fabriquées en **matériaux composites**, notamment à partir de fibres de carbone pour résister aux agressions marines.

L'éolienne est aussi composée de métaux que l'on retrouve :

- ▶ dans les câbles électriques principalement composés **de cuivre ou d'aluminium** ;
- ▶ dans la génératrice qui intègre un aimant permanent dans lequel on trouve des **terres rares** (néodyme et dysprosium) pour améliorer les performances de la turbine. Des travaux sont en cours pour diminuer la consommation de terres rares, voire les substituer, sans diminuer la performance des machines.¹¹

Selon une étude réalisée par l'ADEME sur les terres rares¹² dans l'énergie, à horizon 2030, la demande en terres rares pour l'éolien en mer et terrestre en France représentera moins de 1% de la demande annuelle mondiale en néodyme et un peu moins de 4% de la demande annuelle en dysprosium.

11. K.P. Skokov and O. Gutfleish, Heavy rare earth free, free rare earth and rare earth free magnet - vision and reality, Scr Mater, 154 (2018) ; J. Mohapatra and J.P. Liu, Rare-earth-free permanent magnet : the past and future, Handbook of Magnetic Materials, Editions E.Bruck, Elsevier, 2018.

12. Terres rares, énergies renouvelables et stockage d'énergies, ADEME, octobre 2020.

2.5.

Quelles sont les étapes d'installation d'un parc ?

Après la fabrication des différents composants du parc (nacelles, pales, mâts, fondations, câbles, sous-station électrique, etc.) intervient la phase d'assemblage, puis d'installation¹³ :

- des fondations, des câbles et de la sous-station électrique ;
- des éoliennes sur les fondations, en mer pour l'éolien posé, et à quai pour l'éolien flottant.

La plupart du temps, les mâts, les nacelles et les pales sont transportés sur une plateforme où des moyens de construction en mer permettent d'installer le mât sur sa fondation, puis la nacelle sur le mât et enfin de fixer les pales sur la nacelle.

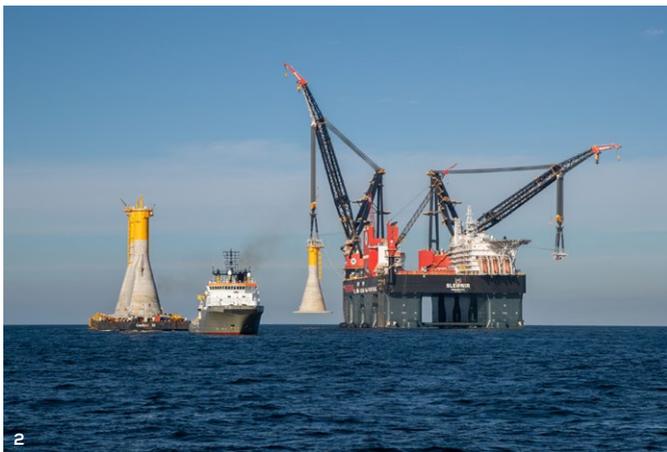
Pour un parc flottant, la fabrication et l'assemblage de l'ensemble des composants sont réalisés à terre, dans un ou plusieurs ports. Les éoliennes sur leurs fondations flottantes seront ensuite remorquées au large, vers leur site d'installation, pour y être ancrées et raccordées.

La construction et l'installation d'un parc en mer dure entre trois et six ans. Les aléas météorologiques jouent un rôle important dans la durée des travaux.

1. Transport sur barge de fondations posées en béton sur le parc éolien de Fécamp
2. Installation de fondations posées en béton sur le parc éolien de Fécamp - WPD
3. Installation d'un pieu
4. Installation d'une fondation type jacket
5. Assemblage d'une éolienne
6. Installation du poste de transformation en mer
7. Éolienne offshore flottante (crédit photo : Valéry Jonchery)



13. Cette phase intervient en mer pour l'éolien posé et au port pour l'éolien flottant.



2



5



7

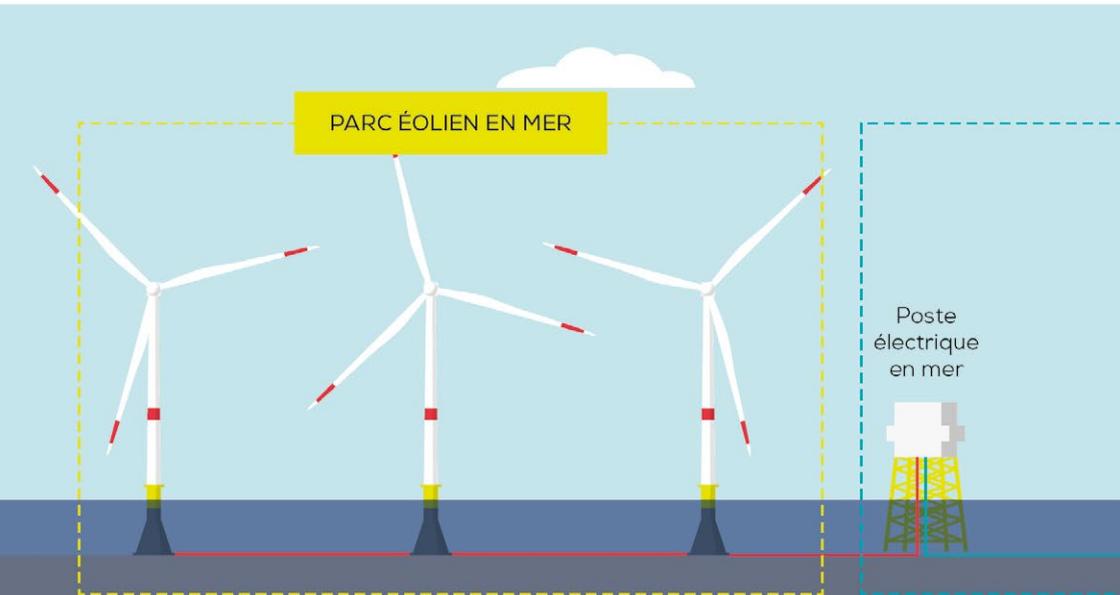
2.6.

Comment les éoliennes sont-elles raccordées au réseau électrique ?

Le raccordement des parcs éoliens en mer au réseau électrique est assuré par RTE, le gestionnaire national du réseau de transport d'électricité. RTE est à la fois chargé de réaliser les raccordements électriques en mer (du poste électrique à la terre), mais aussi à terre, jusqu'au poste source le plus proche.

Les éoliennes sont reliées entre elles par des câbles électriques (les câbles inter-éoliennes, propriété du producteur) connectés à un poste électrique en mer. Ce dernier permet d'intégrer la production du parc au réseau électrique, en convertissant la tension de l'électricité produite (33 ou 66kV en général) au niveau adapté au réseau

de transport national (225kV, en France pour les parcs construits et en construction). L'électricité est ensuite acheminée à terre par des câbles, parfois sous le fond marin ou protégés, généralement au nombre de deux ou trois, appelés câbles export, qui constituent la liaison électrique sous-marine.

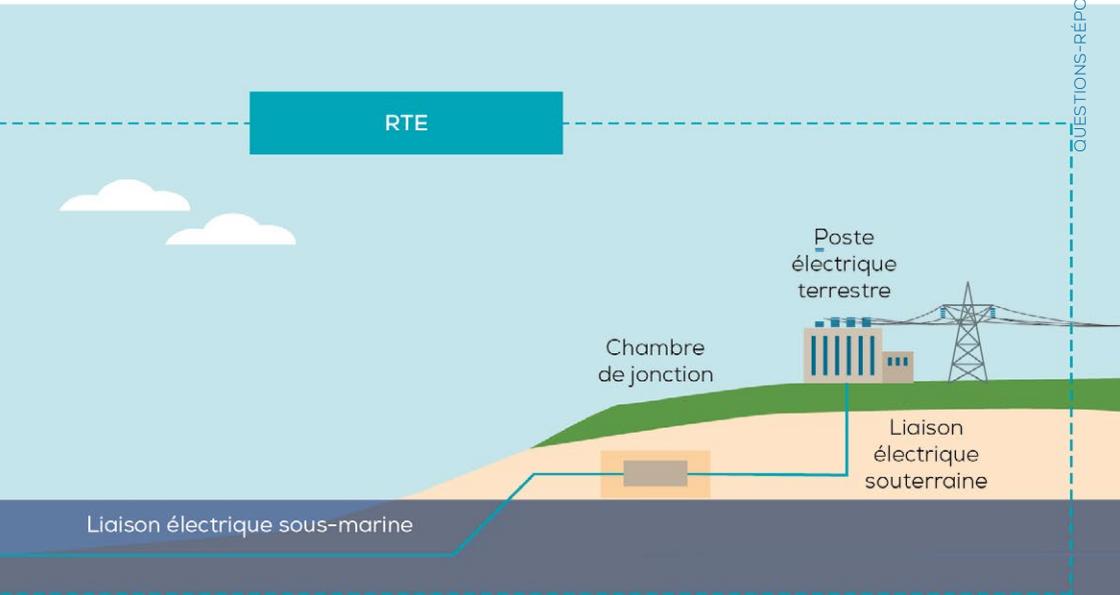


La chambre de jonction relie les câbles sous-marins aux câbles souterrains qui rejoignent ensuite un poste électrique terrestre, préexistant ou créé dans le cadre du projet.

LE SAVIEZ-VOUS ?

L'électricité injectée sur le réseau est consommée au plus proche des lieux de production, puis, alimente le réseau national, contribuant ainsi à la sécurité d'approvisionnement énergétique de l'ensemble du pays.

À l'avenir, les parcs, plus puissants et plus éloignés de la côte, seront raccordés avec une technologie déjà expérimentée dans certains pays : le transport de l'électricité en courant continu à haute tension. Cela permettra de limiter le nombre de postes électriques en mer et de câbles d'exports par rapport au courant alternatif mais aussi d'augmenter le potentiel de puissance installée des parcs (jusqu'à 2000MW par poste).



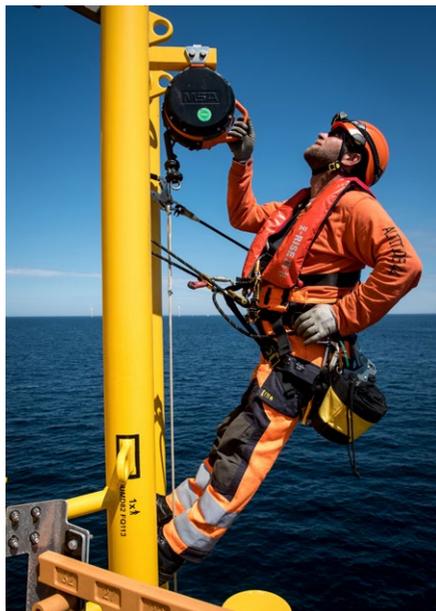
Comment s'effectuent l'entretien et la maintenance des éoliennes en mer ?

Comme tout équipement industriel, une éolienne en mer nécessite un entretien et une maintenance régulière. Les exploitants des parcs, notamment depuis une base de maintenance dédiée, située en général à proximité du parc lui-même, suivent en permanence le fonctionnement de l'installation.

Les opérations de « maintenance préventive », qui ne nécessitent pas de moyens lourds, visent à prévenir toute défaillance et à vérifier le bon état des machines. Elles sont effectuées en général une fois par an, la plupart du temps au printemps et en été, et durent de trois à cinq jours. Chaque éolienne est inspectée par une équipe de deux à six personnes.

Les opérations de « maintenance corrective » permettent de remédier à des dysfonctionnements. Ce type d'opération est réalisé au moyen de grues, installées sur les éoliennes. Si l'une des éoliennes nécessite une intervention plus lourde, en cas de panne ou de bris de pales, de génératrice ou du transformateur, des navires seront appelés et interviendront.

Selon les conditions météorologiques et l'éloignement du parc par rapport à la côte, les déplacements des techniciens de maintenance s'effectuent par bateau et par hélicoptère (si les opérations ne nécessitent pas de pièces lourdes de rechange). Ces bateaux doivent être en mesure de transporter entre 12 et 24 passagers et environ 4 tonnes de charge utile.





2.8.

Comment est gérée la sécurité au sein des parcs ?

La sécurité des installations et des personnes est encadrée par l'État et mise en place par l'opérateur. En effet, le milieu marin impose de redoubler d'attention. Des formations spécifiques sont mises en œuvre pour les personnels destinés à intervenir sur un parc éolien en mer.



2.9.

Que se passe-t-il à la fin de la période d'exploitation d'un parc éolien en mer ?

La durée d'exploitation d'un parc en mer, définie dès l'appel d'offres, s'établit en général entre 25 et 35 ans.

En fin d'exploitation, l'opérateur a l'obligation de démanteler et de remettre le site en état. C'est une condition essentielle inscrite dans les documents d'autorisation du parc. Dès l'origine, une garantie financière est constituée pour que les fonds nécessaires au démantèlement soient disponibles. Quelques années avant la fin de l'exploitation, l'exploitant doit transmettre à l'État son plan de démantèlement intégrant une étude qui évalue les impacts du démantèlement sur l'environnement.

La remise à l'état initial prévoit de retirer toutes les infrastructures installées dont les fondations, sauf si les études d'impact démontrent qu'elles favorisent la biodiversité.

PREMIER DÉMANTÈLEMENT RÉALISÉ AU MONDE

Le premier parc à avoir été démantelé est le parc Yttre Strenggrund (Monopieu) de Vattenfall en Suède - un parc de 10 MW avec 5 éoliennes, installé en 2001 et démantelé en 2015.

► pour le détail se référer en section 3.10



Comment les composants des parcs éoliens en mer sont-ils recyclés ?

Plus de 90 % d'une éolienne est recyclable et recyclée. La réglementation impose un taux de recyclage de plus en plus élevé, et des solutions sont en train d'émerger pour les matériaux plus difficiles à recycler.

QUE DIT LA RÉGLEMENTATION DE 2008 SUR LES DÉCHETS ?

La directive-cadre sur les déchets de 2008, transposée par la loi sur l'économie circulaire (Code de l'Environnement) prévoit le traitement des éoliennes en fin de vie. L'abandon des éoliennes sur le territoire français et la mise en décharge des pales des éoliennes au sein de l'UE sont strictement interdits.

L'Union européenne impose le respect de la hiérarchie de gestion des déchets. Afin de les réduire, une réutilisation des composants lors du repowering¹⁴ est réalisée. Si ce n'est pas possible, le recyclage est envisagé en priorité.

ÉTAT DES LIEUX DU RECYCLAGE EN FRANCE

NB : Étant donné que les premières éoliennes en mer viennent d'être construites en France, il n'y a pour l'instant pas eu de démantèlement et recyclage à proprement parler. Ce paragraphe représente la filière éolienne française dans son ensemble ainsi que le retour d'expérience des parcs en mer européens.

Afin de réduire la quantité de déchets issus des éoliennes à éliminer, la filière privilégie avant tout la réutilisation ainsi que le recyclage des éoliennes, puis dans un second temps, la récupération d'énergie et, en ultime recours, l'élimination en décharge.

L'acier et le béton qui représentent 90% du poids d'une éolienne, ainsi que le cuivre et l'aluminium sont entièrement recyclés et les autres matériaux composites sont intégrés à des filières de valorisation (ADEME, 2019).

14. Le repowering consiste au démantèlement des anciennes installations pour les remplacer par de nouvelles éoliennes. L'avantage de cette opération est qu'une partie des infrastructures existantes peut être réutilisée : voies d'accès, raccordement...

L'arrêté du 22 juin 2020 prévoit même de relever encore davantage les objectifs en matière de recyclage ou de réutilisation des éoliennes démantelées :

- ▶ au 1^{er} juillet 2022, au minimum 90% de la masse totale des éoliennes, fondations comprises, ou 85% lorsque l'excavation des fondations fait l'objet d'une dérogation, doit être réutilisée ou recyclée. De plus, 35% de la masse des rotors doivent faire l'objet d'une réutilisation ou d'un recyclage ;
- ▶ depuis 2024, 95% de la masse totale du parc doit être réutilisable ou recyclable.

DES PROJETS EN COURS POUR AMÉLIORER LE RECYCLAGE

Les pales, composées de matériaux composites, sont plus difficiles à recycler. Cependant des études sont en cours pour améliorer leur conception afin qu'elles soient plus facilement recyclables : utilisation du composite comme combustible en cimenterie, incorporation dans les produits du BTP, récupération des fibres de carbone, etc. (ADEME, 2019).

En 2021, des constructeurs ont mis au point des techniques permettant de recycler intégralement les pales d'éoliennes :

Pour les parcs autorisés à partir de 2023, 45% de la masse des rotors devront être réutilisables ou recyclables, puis 55% pour les parcs autorisés à partir de 2025.

L'ensemble de ces objectifs a reçu le soutien de la filière éolienne française et, plus largement, européenne.

▶ une technique consiste en un premier temps à séparer les fibres de l'époxy, qui est un polymère. Les fibres sont alors recyclées par des filières de traitement existantes tandis que l'époxy subit un traitement chimique afin de séparer ses matériaux constitutifs. Ces derniers peuvent alors être recyclés et pourront être réutilisés pour refabriquer de l'époxy. A noter que cette innovation, mise au point en collaboration avec le producteur d'époxy Olin, l'Institut Technologique Danois et l'université Aarhus au Danemark, pourra s'appliquer dans le recyclage d'avions ou de voitures.

▶ un autre acteur industriel a lancé la commercialisation d'un nouveau modèle de pale, la RecyclableBlade, 100% recyclable. Cette pale est formée d'une nouvelle résine qui permet de séparer les matériaux plus facilement en préservant les propriétés de ces derniers. Les pales pourront donc être réutilisées.



CHAPITRE 3.

QUELLES SONT LES INTERACTIONS ENTRE L'ÉOLIEN EN MER ET L'ENVIRONNEMENT ?

Le GIEC¹⁵ nous rappelle que, sans le développement des énergies renouvelables, le changement climatique qui, selon l'IPBES¹⁶, constitue l'une des causes principales de l'érosion de la biodiversité, ne pourra être maîtrisé. Aujourd'hui, l'augmentation de température provoque des effets en cascade sans précédent, comme la fonte des glaces, l'élévation du niveau de la mer, des vagues de chaleur océaniques et l'acidification des océans. Ces changements finissent par entraîner des incidences durables sur la biodiversité marine, ainsi que sur la vie et les moyens de subsistance des communautés des littoraux.

L'éolien en mer, par la puissance de sa production électrique, a la capacité de nous aider à réduire rapidement nos émissions de carbone et à contribuer à maintenir l'augmentation de la température du globe en-deçà de 2°C par rapport aux niveaux préindustriels.

Cependant, comme toute activité humaine, l'éolien en mer – même si son déploiement est réalisé avec le souci constant de son environnement – a des effets sur le milieu dans lequel il s'implante.

QUEL EST LE BILAN CARBONE DES PARCS ÉOLIENS EN MER ?

Le Bilan Carbone est une méthode pour comptabiliser les émissions de gaz à effet de serre (GES) d'une entreprise, d'un produit ou d'un individu sur l'ensemble de sa durée de vie.

Les émissions de gaz à effet de serre sont calculées en prenant en compte les activités liées à chaque phase de projet d'un parc éolien en mer, c'est-à-dire :

- ▶ La réalisation des études préalables (campagnes en mer) lors du développement du projet ;
- ▶ La production des matières premières et l'énergie nécessaire à la fabrication des équipements du parc ;
- ▶ L'ensemble de l'énergie utilisée pendant la construction du parc et son exploitation ;
- ▶ L'énergie nécessaire au retrait des composants du parc lors de son démantèlement ainsi que leur traitement dans les centres de valorisation.

L'étape la plus émettrice de carbone est celle de la production des matières premières nécessaires à la fabrication et au fonctionnement des machines avec près de 50% de rejets de GES. Pendant toute la phase d'exploitation, ces rejets sont estimés à 10% des émissions de carbone du parc.

15. GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

16. La Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques (IPBES) est un organe intergouvernemental créé en 2012. Il est placé sous l'égide du Programme des Nations unies pour l'environnement, du Programme des Nations unies pour le développement (PNUD), de l'Organisation des Nations unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO) et de l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). Il siège à Bonn, en Allemagne, et compte aujourd'hui 132 États membres.

Émissions de GES et comparaison de bilans carbone pour le parc éolien au large de Fécamp

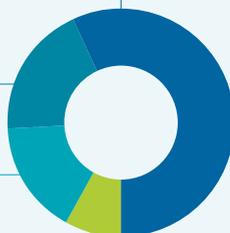
Source : ADEME & Association Bilan Carbone

57 % Matières premières

19 % Développement et installation du parc

16 % Démantèlement

8 % Exploitation et maintenance



Les quantités de gaz à effet de serre émis par un projet sont exprimées en tonnes équivalent CO₂ (teq.CO₂).

Le Bilan Carbone des parcs français¹⁷ est compris entre 554 000 et 754 000 teq.CO₂ soit – ramenés au kWh produit – de l'ordre de 14 à 18 g eq.CO₂/kWh, des chiffres à comparer au niveau d'émissions de l'ensemble du parc électrique français actuel (72 g eq.CO₂/kWh) et européen (306 g eq.CO₂/kWh).

À SAVOIR :



1060 g
eq. CO₂/kWh

production
d'électricité à
partir du charbon



730 g
eq. CO₂/kWh

production
d'électricité à
partir du fioul



418 g
eq. CO₂/kWh

production
d'électricité à
partir du gaz



14 à 18 g
eq. CO₂/kWh

production
d'électricité à partir
de l'éolien en mer

L'énergie éolienne en mer se place donc parmi les sources de production d'énergie les moins émettrices de gaz à effet de serre et les plus efficaces pour décarboner rapidement le mix énergétique.

17. Sur la base des 6 premiers parcs attribués.

Comment sont étudiés les potentiels impacts d'un parc éolien en mer sur l'environnement ?

L'impact d'un parc éolien sur le milieu marin concerne les trois phases du projet :

- La phase de développement ;
- La phase de construction ;
- La phase d'exploitation et de maintenance, y compris les opérations liées à la déconstruction.

La législation européenne et la réglementation française prévoient que les projets de parcs éoliens en mer, comme d'autres grands projets, fassent l'objet, dès leur conception, d'une étude d'impact environnemental préalable. Cette étude, essentielle, consiste à recenser et analyser l'ensemble des impacts que pourrait avoir le projet sur son environnement. Elle intègre, notamment, les enjeux relatifs aux oiseaux, poissons et mammifères marins afin que le projet ne se réalise que dans des conditions limitant son impact sur le milieu.

Les impacts d'un projet, quel qu'il soit, peuvent se traduire par la dégradation

de la qualité environnementale. La démarche ERC – éviter, réduire, compenser – (voir encadré) a pour objectif d'éviter les atteintes à l'environnement, de réduire celles qui n'ont pu être évitées et, le cas échéant, de compenser les effets qui n'ont pu être ni évités, ni suffisamment réduits.

Comme tout porteur de grand projet, chaque développeur de parc éolien en mer a l'obligation de mettre en œuvre cette démarche. Le rôle que jouera le parc dans la transition énergétique avec la production massive d'une électricité décarbonée ne dispense en rien son développeur de cette obligation.

Qu'est-ce qu'une étude d'impact ?

Source : Dossier du maître d'ouvrage de Dunkerque

État initial

Description des milieux naturel, physique et humain

Mesures ERC et de suivi

Mesures d'évitement
Mesures de réduction
Mesures de compensation
Mesures de suivi



Description du projet

Présentation des choix techniques et des caractéristiques variables

Évaluation des impacts

Prise en compte de la sensibilité (avifaune, mammifères marins...) aux effets générés par le projet

AU MOMENT DU CHOIX DES ZONES PAR LES POUVOIRS PUBLICS

En France, une première partie d'acquisition de données environnementales est réalisée par les organismes mandatés par l'État (Cerema, Office français de la biodiversité, bureaux spécialisés, etc.) au moment où sont étudiées les zones de développement de l'éolien en mer.

APRÈS DÉSIGNATION DU LAURÉAT

Le lauréat d'un appel d'offres et RTE consultent des bureaux d'études spécialisés pour approfondir les études sur l'ensemble des potentiels impacts environnementaux. Les données recueillies permettent la réalisation de l'étude d'impact environnemental, qui doit décrire l'état initial du site, évaluer les impacts du projet et présenter les mesures environnementales liées à son déploiement.

Cette étude d'impact constitue une pièce essentielle des demandes d'autorisations administratives pour la construction, l'exploitation et le raccordement du parc. La zone géographique d'étude est à géométrie variable afin de couvrir la diversité des compartiments biologiques : les échelles d'études et d'observations s'étendent de quelques mètres, centaines de mètres (par exemple : espèces sous-marines sédentaires) à plusieurs dizaines de kilomètres (par exemple : oiseaux migrateurs ou mammifères marins).

LA DÉMARCHE ÉVITER, RÉDUIRE, COMPENSER (ERC)

Conformément au Code de l'environnement, la démarche « Éviter, Réduire, Compenser » dite « ERC », a pour objectif d'intégrer le plus en amont possible la prise en compte des enjeux environnementaux et des usages de la mer lors de la conception d'un projet éolien.

Cette démarche décline la mise en œuvre opérationnelle du principe de précaution. Elle consiste tout d'abord à éviter les impacts du projet, les réduire à un niveau acceptable ensuite, et, en dernier lieu, à compenser ses éventuels impacts résiduels significatifs si les deux étapes précédentes n'ont pas permis de les réduire à un niveau acceptable.

La démarche ERC est mise en œuvre dans le cadre du processus aboutissant in fine à la délivrance d'une autorisation de construire un parc éolien en mer. Elle s'applique à tout projet, sur sa partie marine comme sur sa partie terrestre (raccordement).

(Source : Dossier du maître d'ouvrage de Normandie, 2020)

Quels sont les effets observés sur la biodiversité marine ?

Le comité français de l'UICN¹⁸ a réalisé un rapport intitulé « Analyse de l'intégration des enjeux de biodiversité dans l'évaluation environnementale des projets éoliens offshore ».

Il explique que :

« Des effets peuvent se manifester à chaque phase du cycle de vie du parc, qui diffèrent suivant la technologie (fixe, flottant) et les solutions techniques choisies par les maîtres d'ouvrage :

► **Pendant la phase de préparation** (une à plusieurs années), des navires interviennent pour des campagnes de mesures diverses (sondages, prélèvements, forages, observation de la faune et de la flore...), entraînant des modifications des fonds marins (perte ou modification des habitats et remises en suspension des matériaux) et l'émission de bruits et de vibrations. Ces effets sont généralement localisés, temporaires et de faible intensité.

► **Pendant la phase de construction** (deux à trois ans), les effets sont associés à des opérations de forage, battage de pieux, modifications locales des fonds, réalisation de tranchées pour ensouillage de câbles, dépollution pyrotechnique, remorquage de flotteurs, utilisation de navires auto-élévateurs de type « jackup », mise en place d'ancres et de lignes de mouillage, etc., qui entraînent des perturbations physiques généralement localisées et

temporaires mais parfois importantes (bruit, turbidité¹⁹...).

► **Pendant la phase d'exploitation** (20 à 25 ans), les principaux effets sont liés au mouvement des pales et à la surface aérienne balayée, aux émissions sonores, lumineuses (signalisation), électromagnétiques (câbles...) et chimiques (anodes consommables, peintures antifouling...), aux effets liés à la présence de structures fixes (modifications des courants, de la bathymétrie, des vagues, de la sédimentation, des substrats, etc.), et aux opérations de maintenance (navires, aéronefs...).

► **Lors du démantèlement** (qui peut durer typiquement un ou deux ans), les effets attendus sont de même nature qu'à la construction (travaux, bruits, etc.) »

18. La mission de l'UICN (Union internationale pour la conservation de la nature) est d'influencer, d'encourager et d'assister les sociétés du monde entier, dans la conservation de l'intégrité et de la biodiversité de la nature, ainsi que de s'assurer que l'utilisation des ressources naturelles est faite de façon équitable et durable.

19. La turbidité de l'eau correspond à la concentration de matières en suspension dans la masse d'eau, calculée en grammes par litre et mesurée avec un turbidimètre.

À SAVOIR

France Énergies Marines a par ailleurs réalisé des fiches de synthèses sur les principales pressions identifiées pour l'éolien en mer, grâce à une analyse de la littérature scientifique et des retours d'expérience des parcs existants en France et en Europe. Sur les 13 pressions identifiées, seulement 4 demandent une attention particulière : le changement d'habitat, les émissions sonores et électromagnétiques ainsi que les collisions.

En parallèle, l'**Observatoire de l'éolien en mer**²⁰ a été mis en place par l'État en avril 2022, afin d'améliorer les connaissances scientifiques du milieu marin dans les zones de France métropolitaine où des projets de parcs éoliens marins sont susceptibles d'émerger. Doté d'un budget de 50 M€ sur 3 ans (2022-2024), il est en charge de valoriser les connaissances existantes et de mener de nouveaux programmes d'acquisition de connaissances, tant génériques que localisées, sur le milieu marin et les impacts de l'éolien en mer sur ce milieu.



Observation des poissons lors de la pose de pieux (crédit photo : Ailes Marines)

20. <https://www.eoliennesenmer.fr/observatoire/presentation>

Comment les éoliennes en mer cohabitent-elles avec les oiseaux et les chauves-souris ?

L'implantation d'éoliennes peut, dans certains cas, modifier le comportement de vol des oiseaux et chauves-souris (modification des trajectoires) voire engendrer des risques de collision. La réduction de l'éclairage pour éviter d'attirer les oiseaux ainsi que l'adaptation de la localisation, l'espacement et l'orientation des éoliennes lors de la conception permettent de réduire le risque de collision.

Extrait de l'ouvrage « Les éoliennes en mer Questions – Réponses²¹ »

L'émergence des projets éoliens en mer représente une opportunité pour mieux connaître la biodiversité avifaunistique au large. Afin d'évaluer l'impact potentiel sur l'avifaune, il est important de définir l'état initial du site et de mener une étude d'impact. L'expertise ornithologique des associations naturalistes locales est essentielle. L'enjeu est d'identifier, au regard du lien fonctionnel des oiseaux avec la zone, les impacts directs et indirects du projet éolien sur les oiseaux. Des mesures sont alors prévues pour éviter, réduire, voire compenser les impacts.

L'état initial devra prendre en compte les espèces d'oiseaux terrestres, côtières et marines, autrement dit tous les oiseaux vivant en relation régulière ou sporadique avec le milieu marin. Les données concernant les sites de nidification peuvent renseigner sur les trajectoires probables des déplacements journaliers de ces espèces, et celles concernant les sites d'hivernage, les couloirs de migration.

Une expertise en mer est ensuite menée afin de compléter et d'affiner les résultats. Le lien fonctionnel entre l'oiseau et le milieu marin variant beaucoup en fonction de la biologie de l'espèce, de la saison ou bien encore du cycle de développement de l'oiseau, il est essentiel de mener une campagne scientifique en mer couvrant au minimum une année biologique. Des expertises ornithologiques en bateau, en avion, depuis la côte sont généralement conduites. Des mesures radar, infrarouge et de détecteur de chocs sont des techniques modernes qui offrent une complémentarité intéressante.

Il existe trois catégories d'impacts sur les oiseaux liés au développement de parcs éoliens : la perte d'habitat, le dérangement (par effet « barrière » lors des migrations ou bien par effet cumulé avec d'autres activités) et enfin le risque de collision avec les pales en mouvement.

La perte d'habitat représente la première source d'impact sur les oiseaux marins. Bien qu'un parc éolien en mer ait un rendu aéré, environ un km entre chaque

21. « Les éoliennes en mer Questions - réponses », Philippe GOUVERNEUR en collaboration avec Françoise JOUET, Le cherche-midi, 2012. Il est possible aussi de se référer aux études plus récentes en anglais FEM OES Environmental Status of the Science 2020, ou au référentiel de l'OFB.

machine, l'artificialisation d'un espace vierge et la venue des agents de maintenance conduisent à une perte d'habitat pour certaines espèces. Le dérangement occasionné instaure un comportement d'évitement, qui augmente avec la taille du parc. Cela peut conduire à une perte durable d'habitat, voire, pour certaines espèces, à une désertion totale de la zone. Au contraire, d'autres espèces, tels les cormorans, peuvent profiter de la partie émergée des fondations pour se poser. Le potentiel récifal des fondations et les enrochements à la base peuvent également attirer certains oiseaux, goélands et cormorans, par exemple.

La présence d'éoliennes entre les zones de repos et les zones de nourrissage, mais également sur les routes migratoires, peut générer des dérangements pour les oiseaux. Contraints d'effectuer un plus grand parcours pour éviter l'obstacle, ils puisent davantage dans leur réserve de graisse ; ce qui peut affecter leurs capacités de résistance et de reproduction. Bien qu'à l'échelle d'un parc éolien, l'impact sur l'allongement de la migration soit marginal, il faut raisonner à l'échelle d'une façade maritime pour implanter intelligemment les parcs éoliens, de concert avec l'expertise ornithologique locale.

Enfin, le risque de collision d'un oiseau avec une pale d'éolienne est réel, bien qu'à relativiser. Les éoliennes de dernière génération brassant un disque de 120 m de diamètre, voire plus, la possibilité d'un choc avec un volatile concerne la zone débutant à 30 m d'altitude jusqu'à 150 m au-dessus de la mer. En fonction des techniques de vol, certaines espèces comme le puffin des Baléares ne sont que marginalement concernées puisqu'opérant un vol au ras de l'eau, tandis que d'autres, telles les oies sauvages, volent à une altitude telle qu'elles repèrent les éoliennes à des kilomètres et peuvent aisément contourner l'obstacle. D'une manière générale, les oiseaux migrateurs sont plus touchés que les oiseaux sédentaires. Ces derniers, en raison de leur présence annuelle sur le site, s'habituent progressivement à la présence des éoliennes. Les heurts surviennent généralement la nuit, les oiseaux migrateurs étant attirés par les lumières de balisage des aérogénérateurs.

Bien que la mortalité liée au fonctionnement des éoliennes existe effectivement (en moyenne un oiseau par an et par éolienne), elle est sans commune mesure avec celle d'autres activités humaines nettement plus génératrices d'accidents, comme le transport automobile, les pesticides, les baies vitrées, etc.

D'une façon générale, les chauves-souris ne fréquentent pas le milieu marin mais plutôt la proximité des côtes. Il a toutefois été identifié des individus à plus de 30 km du rivage en mer du Nord. Ceci est sans doute dû à un vol de transit entre deux côtes. Les chauves-souris sont très rarement en vol par vent fort, mais plutôt dans des conditions calmes quand les éoliennes ne tournent pas.

Cependant, attirées par les vibrations générées par le mouvement des pales et par la présence d'insectes autour de la nacelle (la chaleur résiduelle de la génératrice et le balisage du sommet de la turbine qui attirent les papillons de nuit dont les chauves-souris raffolent), ces petits mammifères volants s'exposent parfois au danger de la turbine. Du fait de leur taille minuscule, les chauves-souris ne sont pas directement frappées par la rotation des pales. En réalité, l'absence de blessure externe indique qu'elles seraient victimes d'une baisse brutale de la pression atmosphérique, lors de leur passage à proximité des pales.

Quels types de voisinage entre les dauphins et autres mammifères marins avec les éoliennes ? Quelles sont les mesures prises ?

Les mammifères marins sont des espèces protégées en France. Ces animaux sont particulièrement sensibles au bruit.

Après plus de 20 ans d'exploitation d'éoliennes en mer, les retours d'expérience en Mer du Nord permettent de constater que les principaux effets d'un parc éolien sur les mammifères marins sont liés à la phase d'installation des fondations avec l'émission de bruit lors des opérations de battage des pieux. Les suivis réalisés sur des parcs éoliens à l'étranger montrent que certaines espèces, comme les phoques présents historiquement sur un site d'implantation (par exemple sur le parc danois de Horns Rev), et certains individus (car tous ne se comportent pas de la même manière en fonction de leur sexe et de leur âge) fuient temporairement la zone au début des travaux et reviennent rapidement (1 à 2 jours) lorsqu'ils sont achevés.

Il existe différents moyens pour éviter et réduire les impacts sur ces espèces. La première solution consiste à garantir l'absence durant la phase de construction des espèces concernées dans le périmètre qui délimite les effets du projet sur ce compartiment : c'est la meilleure solution connue à ce jour. À cet effet, des systèmes d'effarouchement sont proposés pour conduire les espèces à quitter, temporairement, la zone le temps du dérangement.

Il est également possible de mettre en marche très progressivement le battage des pieux ou d'installer des systèmes de réduction de bruit à la source, tels que les rideaux de bulles, conçus pour atténuer les nuisances acoustiques.

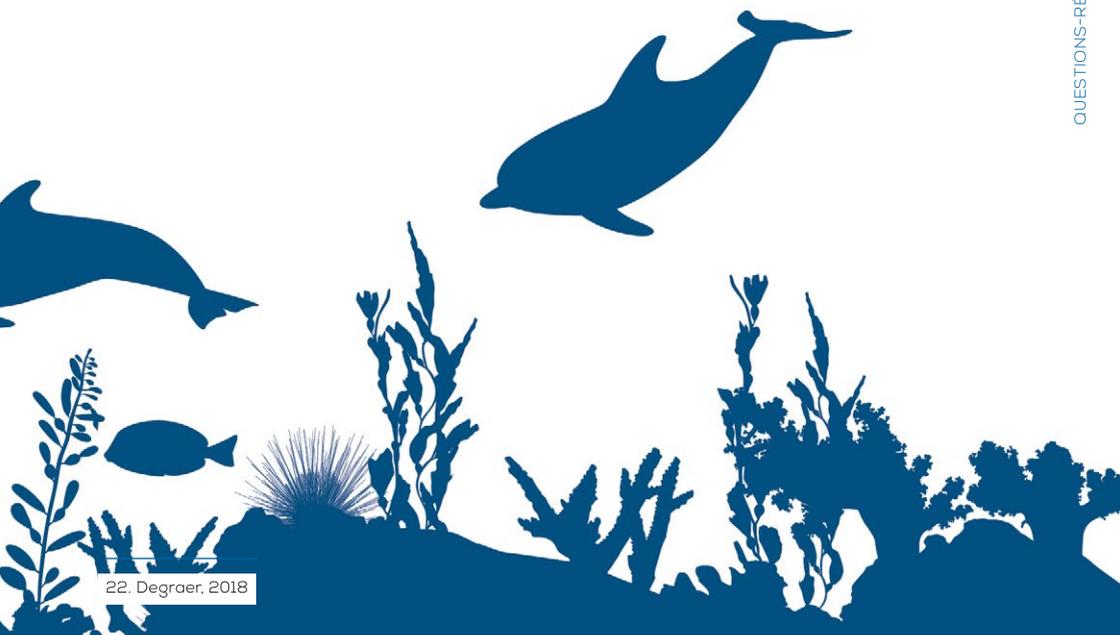


PARCS ÉOLIENS POSÉS « NOBELWING » ET « NORTHWESTER 2 » (BELGIQUE)

L'étude comparative des travaux de battage de pieux avec et sans mesure de mitigation (mesures d'atténuation des émissions sonores – ici un double rideau de bulles) au sein des parcs éoliens « Nobelwing » (construit en 2016 sans mesure de mitigation) et « Northwester 2 » (construit en 2019 avec mesure de mitigation) ont montré une réduction des effets des émissions sonores sur les populations de Marsouin commun par la mise en place des mesures de mitigation. Selon des études récentes, à faible et moyenne distance (0-5 / 5-10 km) de la source d'émission, les taux de détection d'individus sont plus fréquents avec des mesures de mitigation que sans, témoignant de leur efficacité. A plus de 20 km, les variations des taux de détection avec et sans mesures de mitigation ne sont pas significatifs²².

Pour bien connaître l'état des lieux et évaluer au mieux les impacts potentiels et les mesures associées, des observations de la mégafaune, et notamment des mammifères marins, ont été réalisées historiquement par des associations, des services de l'État ou des opérateurs spécialisés sur et à proximité des sites d'implantation de projets éoliens en mer.

L'État, en s'appuyant sur l'Office français de la biodiversité, mène par ailleurs des études à plus grande échelle pour mieux connaître la répartition des espèces sur les différentes façades du littoral français, préalablement au choix des zones de projets et au lancement des procédures de mise en concurrence. Ces études seront prises en compte et complétées par le porteur de projet lors de la phase d'étude d'impact.



Quels peuvent être les effets sur les poissons, mollusques et crustacés ? Quelles sont les mesures prises ?

Les ressources halieutiques correspondent à l'ensemble des espèces de poissons, crustacés et mollusques.

PHASE DE CONSTRUCTION

Les effets sur les ressources halieutiques seront principalement concentrés durant la phase d'installation du parc éolien et de son raccordement. Les retours d'expérience montrent que les effets proviennent principalement du bruit émis lors de la phase de chantier et pendant le remaniement des fonds (pour la pose des câbles, par exemple). Ainsi, l'implantation d'un parc peut avoir un effet sur les frayères et les nourriceries. Au regard des suivis menés dans le cadre de la construction de parcs éoliens en mer en Europe, on constate que les espèces mobiles s'éloignent des sites au moment du chantier et recolonisent la zone, à l'issue des travaux.

PHASE D'EXPLOITATION

Au pied des mâts ou du poste électrique en mer, apparaît souvent un effet « récif » pour les espèces sédentaires avec une colonisation par des mollusques, des crustacés ou des poissons sur les fondations. Le développement de ces espèces peut en effet être favorisé par ce nouveau site qui constituera un nouveau refuge.

L'augmentation de la température et les champs électromagnétiques sont très localisés autour des câbles. Les modifications de température sont comparables aux fluctuations liées aux conditions environnementales et ne mettent pas en évidence d'effets sur la faune.

Concernant les champs électromagnétiques, les nombreuses études déjà menées à ce jour n'ont pas montré d'effet significatif pour les espèces marines, notamment sur les migrations. L'acquisition de connaissances est toutefois poursuivie pour approfondir la compréhension de leurs effets potentiels.

PARC ÉOLIEN POSÉ « ALPHA VENTUS » (ALLEMAGNE)

Les suivis réalisés au sein du parc éolien « Alpha ventus » ont révélé une augmentation locale de la diversité des espèces marines à proximité des fondations. L'installation des fondations et des structures de protection contre l'érosion a créé des surfaces artificielles disponibles pour des espèces de substrats durs (milieux rocheux, etc.) naturellement absentes de cette zone dominée par les substrats meubles (milieux sableux, vaseux, etc.)²³.

POUR ALLER PLUS LOIN

Un programme de contrôle et d'évaluation des impacts sur l'environnement (dont les ressources halieutiques) a été mené par l'Imares (l'équivalent néerlandais de l'Ifremer) sur la première ferme éolienne néerlandaise, construite en 2006 entre 10 et 18 km des côtes. Des analyses ont été réalisées avant et après la construction. L'étude démontre qu'à l'échelle de la zone côtière néerlandaise, aucun effet significatif en termes d'abondance n'a été observé, à l'exception d'une légère augmentation de l'anchois qui pourrait être le résultat de la diminution de la pression de prédation liée à la protection apportée par le parc éolien. À l'échelle du parc, des différences ont pu être relevées entre le nouveau substrat dur (artificiel) et le fond sableux : en effet, de grands groupes de poissons ont été observés près des monopieux et des protections anti-afouillement (cabillaud, tourteau, tacaud, chaboisseau commun, chabot de mer et dragonnet lyre), mais une moindre abondance en poissons plats, sole, limande, plie, et merlan.

Les parcs peuvent-ils avoir des effets sur les sols marins et les espèces qui y vivent ?

Les fonds marins sont colonisés par des espèces animales et végétales, appelées espèces benthiques, également désignées sous l'appellation générique de benthos. Il s'agit d'animaux ou de végétaux qui vivent fixés au sol ou qui se déplacent en rasant le fond.

EN PHASE DE CONSTRUCTION

Les travaux de construction du parc éolien et de son raccordement engendrent temporairement des perturbations sur le benthos, à proximité des fondations (ou des ancrages pour l'éolien flottant) et des différents câbles électriques.

Les principaux effets liés aux interventions sur les fonds comme le remaniement et la remise en suspension des sédiments peuvent engendrer, transitoirement, une augmentation de la turbidité, localisée aux abords de la zone de chantier.

Une perte d'habitat très localisée (au niveau des fondations des éoliennes et du poste électrique en mer) est observée. L'implantation des éoliennes et des câbles dans des zones à moindre enjeu environnemental permet de limiter fortement les impacts sur le benthos.

Un phénomène de recolonisation et rétablissement des communautés benthiques (plus ou moins rapides selon les espèces) est observé après la phase de construction, en fonction de la sensibilité, de la résilience des espèces et des substrats affectés.

EN PHASE D'EXPLOITATION

On observe régulièrement un affilage des sédiments et des densités (biomasse), et une diversité (richesse des espèces) plus élevée des communautés du fond marin (par exemple, vers, mollusques, crustacés et étoiles de mer) à proximité des éoliennes. Des espèces associées aux substrats durs apparaissent également et augmentent en abondance dans les sédiments meubles environnants.

Enfin, concernant les émissions électromagnétiques des câbles, l'effet, très localisé, dépend de la sensibilité de chaque espèce. Les études in situ restent à approfondir pour bien comprendre les effets sur la faune benthique. Les techniques mises en œuvre pour la pose des câbles (ensouillage, enrochement, etc.) évitent tout contact direct avec les câbles et réduisent les champs émis dans les zones accessibles à la faune. La pose en bundle (câbles jointifs) conduit à une atténuation des champs émis et une plus forte réduction avec la distance. L'enfouissement des câbles, quand il a lieu, permet néanmoins d'atténuer les potentiels effets sur ce compartiment.

3.7.

Quels peuvent être les effets sur la turbidité, la qualité de l'eau, la qualité des sédiments ?

Selon la nature des sols, la mise en place des fondations et des différents câbles peut générer un remaniement et la mise en suspension des sédiments, susceptibles d'engendrer transitoirement une augmentation de la turbidité localisée, généralement, aux abords de la zone de chantier.

Les études réalisées autour des parcs éoliens en mer existants en Europe montrent que les installations ont très peu d'impacts sur la qualité de l'eau.

En effet, cette dernière dépend très fortement des arrivées d'eau provenant de la côte (rejets terrestres des fleuves et autres) mais aussi de la météo (variation de températures), marées et pollutions extérieures.



L'installation d'éoliennes en mer est-elle ou sera-t-elle possible en zone protégée ?

Deux directives européennes constituent la base réglementaire du réseau écologique européen Natura 2000 :

- La directive « Oiseaux », du 2 avril 1979, qui vise la conservation à long terme des espèces d'oiseaux sauvages de l'Union européenne ;
- La directive « Habitats faune flore », du 21 mai 1992, qui établit un cadre pour les actions communautaires de conservation d'espèces de faune et de flore sauvages ainsi que de leur habitat.

Les sites désignés au titre de ces deux directives forment le réseau Natura 2000 et font l'objet de mesures particulières de protection.

En France, les parcs éoliens en mer peuvent s'implanter dans ces zones protégées. Néanmoins, lors de la délivrance de l'autorisation environnementale, le dossier déposé devra inclure des études spécifiques approfondies, avec potentiellement plusieurs autres autorisations et des mesures spécifiques seront mises en œuvre dans le cadre de la méthode ERC (éviter, réduire, compenser).

C'est, par exemple, le cas du parc éolien en mer de Dunkerque dont le périmètre de la zone proposée à l'appel d'offres, représente de l'ordre de 5 % de la superficie des sites Natura 2000 « Bancs des Flandres » qui s'étendent de la frontière belge, à l'Est, jusqu'au droit de Calais, à l'Ouest. D'autres parcs européens, notamment en Belgique, sont situés en zone Natura 2000.

Il est composé d'un ensemble de sites naturels, terrestres et marins, et vise à assurer la survie à long terme des espèces et des habitats particulièrement menacés, à forts enjeux de conservation en Europe. L'objectif de la démarche européenne, fondée sur les directives Oiseaux et Habitats faune flore, est double :

PRÉSERVER LA DIVERSITÉ BIOLOGIQUE ET LE PATRIMOINE NATUREL

Le maintien ou le rétablissement du bon état de conservation des habitats et des espèces s'appuie sur le développement de leur connaissance ainsi que sur la mise en place de mesures de gestion au sein d'aires géographiques spécialement identifiées, les sites Natura 2000. Le maillage de sites s'étend sur tout le territoire de l'Union européenne pour une politique cohérente de préservation des espèces et des habitats naturels.

PRENDRE EN COMPTE LES EXIGENCES ÉCONOMIQUES, SOCIALES ET CULTURELLES, AINSI QUE LES PARTICULARITÉS RÉGIONALES

Les projets d'aménagements ou les activités humaines ne sont pas exclus dans les sites Natura 2000, à condition qu'ils soient compatibles avec les objectifs de conservation des habitats et des espèces qui ont justifié la désignation des sites.

La France s'est attachée à valoriser le patrimoine naturel des territoires en encourageant la prise de conscience collective des enjeux écologiques dans les gouvernances des territoires. Il s'agit notamment d'articuler les différentes politiques et dispositifs de gestion des territoires en tenant compte du rôle et de la responsabilité des acteurs, à travers des actions de concertation ou de partenariat. La sensibilisation et l'éducation du grand public aux enjeux de la biodiversité y tient une place essentielle. La dynamique d'un tel réseau nécessite une animation soutenue des réseaux d'acteurs, favorisant les échanges et les bonnes pratiques.

En France, Natura 2000 représente :

- ▶ **33% de la surface marine** de la zone économique exclusive, soit 12 millions d'hectares ;
- ▶ **1776 sites, dont 212 sites marins** : 402 zones de protection spéciales pour les oiseaux (ZPS) et 1374 zones spéciales de conservation (ZSC) ;

Plus d'informations :

- ▶ <https://www.ecologie.gouv.fr/reseau-europeen-natura-2000-0>
- ▶ <https://www.natura2000.fr/natura-2000/qu-est-ce-que-natura-2000>

Quelles sont les mesures prises pour éviter les risques de pollution du milieu marin ?

Il existe plusieurs sources potentielles de pollution : pollutions accidentelles, métaux relargués par les systèmes de protection contre la corrosion et remise en suspension de sédiments préalablement pollués en phase de prospection ou travaux.

POLLUTIONS ACCIDENTELLES

Même si les développeurs travaillent avec des organismes spécialisés tels que le CEDRE²⁴ et malgré les mesures de sécurité prises, le risque zéro n'existe pas. Il est toujours possible qu'une pollution au béton survienne accidentellement en phase de construction (quand il y a coulée de béton sur site), mais la mer diluera très largement la pollution engendrée.

En effet, en prenant la pire des hypothèses, c'est-à-dire le cas où l'intégralité du béton serait exposée à l'eau de mer, seul 5 % du béton serait lessivé. Cette quantité serait progressivement libérée

au cours de l'installation des jackets sur les pieux. En outre, les composants libérés sous l'action des courants avant prise du béton, sont des liants minéraux (les ciments sont issus de la cuisson de produits naturels : silice, alumine carbonate de chaux) avec moins de 0,1 % d'additifs. Compte tenu des volumes en jeu et de leur étalement dans le temps, les effets environnementaux de ces opérations « de bétonnage » sont considérés comme négligeables.

De nombreuses mesures éprouvées existent afin de limiter ces pollutions.

EXEMPLES DE MESURES ERC ET DE SUIVI

E – Ne pas employer de peinture antifouling (peinture empêchant la fixation d'organismes vivants sur les structures immergées) sur les fondations des éoliennes et/ou sur les monopieux.

E – [Mettre] en place une politique HSE [Hygiène Sécurité Environnement] lors de toutes les phases du projet [pour] éviter les pollutions.

C – Lorsqu'une protection des câbles par recouvrement est nécessaire, des matériaux inertes (c'est-à-dire des matériaux ne subissant aucune modification chimique dangereuse) sont utilisés.

S – L'installation de cage à moule (animal filtreur) au centre du parc pour suivre la qualité physico-chimique de l'eau.

Le programme de surveillance et de maintenance de l'exploitant du parc peut parfois inclure l'intervention de plongeurs qui s'assureront du bon état des structures et de leur système de protection.

SITE D'ESSAI « SEM-REV » ÉOLIENNE FLOTTANTE FLOATGEN (FRANCE)

Les suivis menés par l'École Centrale de Nantes sur l'éolienne flottante FLOATGEN (site d'essais SEM-REV) n'ont pas révélé de contamination avérée post-installation. Les teneurs mesurées en plomb, cadmium et mercure sont inférieures aux seuils réglementaires. Les valeurs en mercure, nickel et chrome, sont similaires ou inférieures aux mesures pré-travaux et en zones de référence. Seul le zinc a été retrouvé dans des concentrations supérieures à la moyenne, mais cela avait déjà été mesuré lors de l'état initial réalisé en amont des travaux. À proximité immédiate de l'infrastructure, la richesse spécifique et l'abondance des espèces marines présentes sur le fond sont élevées et similaires aux valeurs observées lors des études menées en amont des travaux (Reynaud, 2021).

PARCS ÉOLIENS POSÉS « Blich Bank » et « Thornton Bank » (BELGIQUE)

Les premiers résultats de suivi réalisés au sein de ces deux parcs belges n'ont pas révélé de teneurs en zinc plus élevées à proximité des éoliennes qu'ailleurs. De plus, il n'existe pas de différence notable entre les concentrations en zinc dans les sédiments situés à proximité ou en périphérie des infrastructures (Degraer, 2019).

COMMENT LES ÉOLIENNES SONT-ELLES PROTÉGÉES DE LA CORROSION ?

Comme toute structure acier destinée au milieu marin, les éoliennes sont protégées de la corrosion par différents dispositifs.

- ▶ **Protection par anode sacrificielle** : une anode sacrificielle est une pièce métallique en zinc qui permet de protéger un autre élément métallique de la corrosion en s'oxydant à sa place.
- ▶ **Protection par courant imposé** : le système ACI (Anode à Courant Imposé), est un générateur de courant qui protège de la corrosion. Il est constitué d'une carte électronique et d'une électrode en titane.

Comment s'organise le démantèlement d'un parc éolien en mer ?

La réglementation française est très stricte en ce qui concerne l'encadrement des opérations de démantèlement des éoliennes en mer (et structures associées) et de remise en état du site. Un retour à un état initial au point de vue physique (morphologie des fonds, conditions hydrodynamiques) et chimique (composition de l'eau et des sédiments) est requis, de même qu'un retour à un état initial du point de vue biologique et, enfin, un retour à un état initial pour les usages de la zone, notamment la pêche, les loisirs et la circulation maritime.

Le maître d'ouvrage est tenu de constituer des garanties financières afin de couvrir les coûts de démantèlement et de remise en état du site après l'exploitation du parc. Cette obligation est fixée dans la convention d'occupation du domaine public maritime signée entre l'État et le maître d'ouvrage.

L'exploitant doit, quelques années avant la fin d'exploitation, transmettre son plan de démantèlement aux autorités.

Les premiers parcs éoliens en mer ont déjà été démantelés en Europe. Les techniques de recyclage des composants des éoliennes continuent d'évoluer.

LE DÉMANTÈLEMENT DU PARC ÉOLIEN DE VINDEBY (DANEMARK)

À ce jour, un exemple représentatif en termes de démantèlement est le parc de Vindeby, au large des côtes danoises, construit en 1991 et démantelé en 2017. Les premiers éléments recueillis précisent qu'un retrait de l'ensemble des produits dangereux des fondations (telles que les peintures contenant des métaux lourds) a été effectué et traité, les pales (60 tonnes de fibre de verre) ont été transportées et analysées pour décider de leur réutilisation ou de leur destruction. Les éléments en acier (452 tonnes) et les câbles ont été renvoyés dans les filières classiques de recyclage. Les matériaux et composants du parc une fois démantelés ont été orientés pour recyclage ou réutilisation dans des lieux ad hoc au Danemark, depuis la zone du parc de Vindeby.

Y a-t-il des effets liés au cumul de plusieurs projets dans une même région ?

Dès les premières réflexions sur l'installation de parcs éoliens en mer, la question du cumul des effets est étudiée. C'est le cas dans les études d'impacts réalisées pour chaque projet et, depuis 2018, le Ministère de la Transition écologique (MTE) pilote un groupe de travail constitué d'experts qui vise à développer une méthode d'évaluation des impacts cumulés entre parcs éoliens ainsi qu'entre les parcs éoliens et les activités préexistantes en mer.

Cet impact est également une préoccupation européenne, dans la mesure où, notamment en mer du Nord, mais aussi dans la Baltique ou encore en mer d'Irlande, les projets développés sous les auspices de plusieurs pays entraînent la mise en place de parcs proches les uns des autres.

Le Ministère de la transition écologique participe aux travaux de l'Union européenne, notamment en lien avec les pays possédant déjà de nombreux parcs afin d'intégrer leurs retours d'expériences et de définir des standards

et des méthodes communes pour l'évaluation des effets cumulés, y compris transfrontaliers.

Les résultats de ces travaux permettront, au niveau français comme européen, d'accroître la connaissance des effets des parcs éoliens en mer et de mieux en tenir compte lors de la définition des futurs projets, en particulier lors de l'octroi des autorisations dans lesquelles seront inscrites les mesures de suivi, d'évitement, de réduction et, le cas échéant, de compensation.





CHAPITRE 4.

COMMENT LES PARCS ÉOLIENS COHABITENT-ILS AVEC LES AUTRES ACTIVITÉS EN MER ?

Les usagers de la mer et du littoral sont nombreux. Les pêcheurs (professionnels et amateurs), les navires de commerce ou militaires, les ferries, les bateaux de plaisance, les entreprises d'extraction de granulats marins, les conchyliculteurs, les touristes et vacanciers et, bien sûr, les riverains. En dehors de ces nombreux usagers et usages, il faut prendre en compte les zones naturelles protégées, à fort patrimoine écologique ou présentant un intérêt archéologique et les zones de protection autour des radars. C'est dans cet environnement que le parc éolien trouve sa place.

L'analyse des cahiers d'acteurs rédigés par les différentes parties prenantes au moment des débats publics organisés par la CNDP²⁵ met en lumière une large acceptabilité. L'ensemble des concertations pour définir les zones les plus propices à accueillir cette activité supplémentaire en mer permet de définir la place adéquate du parc en fonction de son environnement et des nombreuses contraintes à prendre en compte.

25. La Commission nationale du débat public (CNDP) vise à contribuer à favoriser la participation du public à l'élaboration de projets d'intérêt national à forts enjeux sociaux, économiques, environnementaux ou pour l'aménagement du territoire.

4.1.

Les éoliennes sont-elles visibles ou audibles depuis la côte ?

La visibilité des éoliennes dépend de plusieurs facteurs, notamment de leur distance par rapport à la côte, de leur taille, de leur agencement au sein du parc et des conditions météorologiques.

Prenons l'exemple d'éoliennes de 8MW, situées à une distance de 12km de la côte. Leur visibilité est comparable à un objet de 1,7cm placé à 1m de l'œil, soit des proportions similaires à celles des tankers (navire-citerne) qui passent au large de certains rivages.

Dans le cadre de la préparation des projets, l'État et les porteurs de projets réalisent des photomontages pour permettre au public de se projeter.

Concernant le bruit, les expertises acoustiques montrent que les seuils réglementaires admissibles sont respectés pour l'ensemble des riverains des parcs en mer. Par exemple, l'étude réalisée pour le parc de Dieppe - Le Tréport a montré que l'émergence maximale calculée est de l'ordre de 0,9 décibel (A) au droit des récepteurs placés au niveau des habitations à Criel-sur-Mer, ce qui est très inférieur au seuil de 2 décibels à partir duquel un son est perceptible par l'oreille humaine.



Est-il possible de naviguer au sein d'un parc ?

La navigation au sein et autour des parcs est réglementée par les préfetures maritimes en fonction de l'analyse de risques réalisée pour chaque projet.

L'implantation des parcs éoliens en mer est décidée en tenant compte de la navigation maritime (commerciale, pêche et plaisance), afin d'éviter les impacts, les réduire et si besoin les compenser, selon la même démarche que celle adoptée pour l'environnement. Si la navigation commerciale n'est pas envisageable au sein des parcs, l'agencement des éoliennes est pensé en concertation avec les autres usagers de la mer (pêche et plaisance) de manière à leur permettre de poursuivre leurs activités.

Les activités autorisées sont décidées, au cas par cas, par les préfets maritimes, en fonction des risques évalués, avant la mise en service des parcs.

Lors de la phase de travaux, l'accès à la zone du parc peut être réservé aux navires nécessaires à la construction. Néanmoins, les exploitants s'efforcent de ne pas fermer l'intégralité de la zone de manière à garantir, notamment, des couloirs de pêche.

QUELS SONT LES IMPACTS D'UN PARC ÉOLIEN EN MER SUR LES ROUTES MARITIMES COMMERCIALES ?

Les enjeux de sécurité maritime sont pris en compte lors de la définition de la zone d'implantation afin d'éviter les routes maritimes commerciales, les « rails de navigation ». Néanmoins, certains accès aux ports, ou certains transits peuvent être impactés par l'implantation d'un parc. Il appartient à l'État d'organiser éventuellement l'évolution des routes maritimes pour permettre la poursuite du trafic tout en assurant la sécurité de l'ensemble des biens et personnes.

La définition d'une distance de sécurité entre ces installations et le passage des navires est particulièrement importante si le champ est positionné à proximité d'une route de navigation très empruntée, c'est-à-dire un « rail de navigation » ou un chenal d'approche portuaire. Les critères de détermination de cette distance minimale de sécurité qui contribuent à la définition des zones propices à l'installation de champs d'éoliennes en mer, sont édictés par les Affaires Maritimes, dans le cadre défini par l'Association internationale de signalisation maritime (AISM).

Au sein du parc de Dieppe - Le Tréport, la navigation sera restreinte aux navires de moins de 25m de long. Ils ne pourront approcher les éoliennes à moins de 150m, ni le poste électrique à moins de 200m.

► https://aida.ineris.fr/consultation_document/37972#Annexe_1

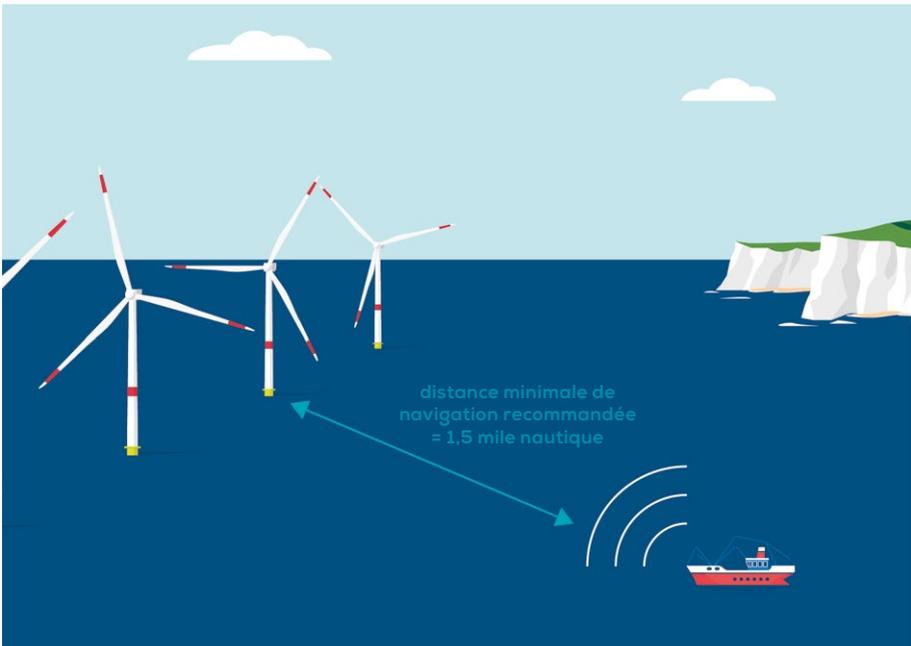
4.3.

Les parcs éoliens ont-ils un impact sur les radars de surveillance maritime et de navigation ?

La présence de parcs éoliens en mer peut entraîner des perturbations sur les réceptions des signaux radars de surveillance maritime, utilisés par l'État pour la surveillance et la sécurité en mer.

Parce qu'un haut niveau de sécurité et de surveillance maritime doit être maintenu, selon les perturbations générées, des mesures de compensation sont mises en place. Elles consistent notamment à installer un nouveau radar sur les équipements du parc éolien lui-même ou à adapter la technologie des radars existants.

Afin d'éviter des perturbations sur les radars de navigation des embarcations naviguant aux abords d'un champ d'éoliennes, une distance minimale de navigation de 1,5 mile nautique (environ 2,8 km) est recommandée.



Quelles sont les règles de balisage aéronautique et maritime pour les parcs éoliens ?

Les parcs éoliens en mer respectent une réglementation particulière en matière de visibilité pour assurer la sécurité maritime et aéronautique.

Pour être visibles par les navigants en mer et dans les airs, les éoliennes sont équipées :

► D'un balisage par marque. La partie émergée des fondations doit nécessairement être peinte en jaune. La teinte grise des éoliennes est définie de manière réglementaire pour l'ensemble des parcs dans les eaux françaises et un certain nombre de marques rouges (cercles, bandes...) doivent également être affichées sur les éoliennes.

► D'un balisage lumineux, qui se décompose en :

- Un balisage maritime, par un feu fixé sur la partie intermédiaire, entre les fondations et le mât de l'éolienne. Ce feu est présent sur toutes les éoliennes et visible à proximité du parc pour qu'elles soient repérées par les navires ;

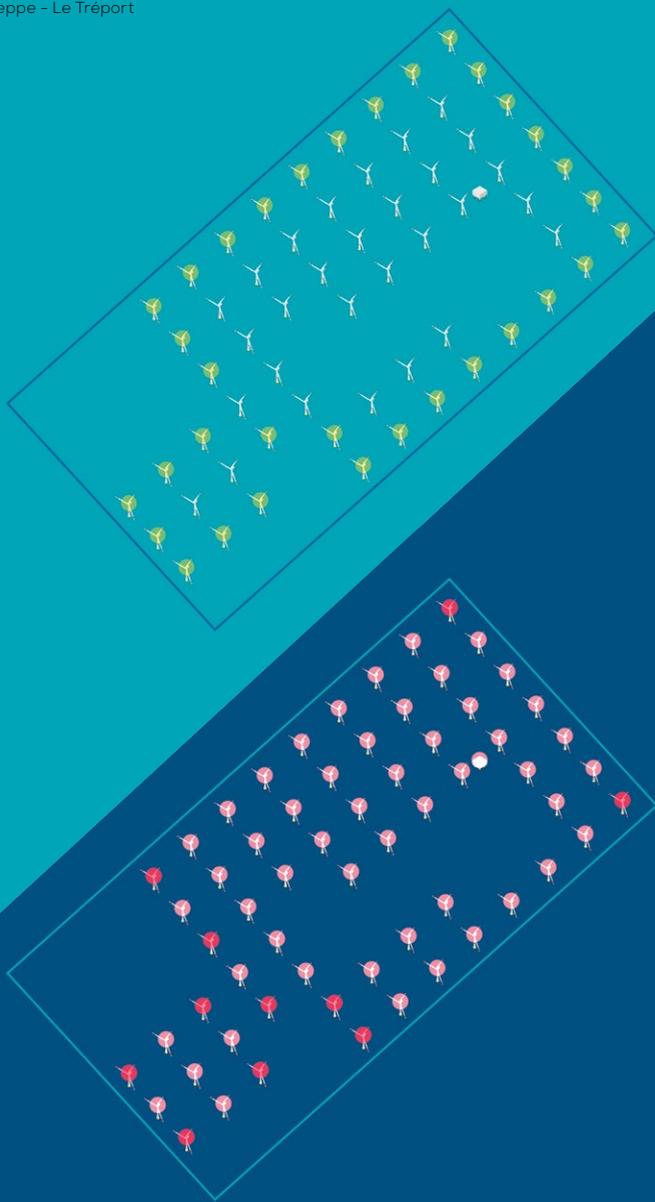
- Un balisage aéronautique de jour comme de nuit (blanc en journée, rouge la nuit), au niveau de la nacelle des éoliennes et du poste électrique en mer, afin de signaler le parc aux avions et aux hélicoptères. Ce balisage est défini par l'arrêté du 23 avril 2018 qui a cherché un équilibre permettant de limiter la visibilité des parcs depuis la côte, tout en signalant correctement les installations pour garantir la sécurité des biens et des personnes. Ainsi, toutes les éoliennes qui constituent le parc ne seront pas équipées du même balisage aéronautique : seules, celles qui encadrent le parc disposeront d'un balisage lumineux intense. Un balisage de plus faible intensité sera installé sur les autres, de manière à ne pas être visible depuis la côte.

Autour du parc, des balises maritimes sont également disposées pour indiquer aux navires la présence de l'installation.



Exemple de balisage lumineux Jour/Nuit

Source : Dieppe - Le Tréport



Comment les parcs éoliens en mer cohabitent-ils avec les activités de pêche professionnelle ?

Afin de limiter les effets des parcs sur l'activité de pêche, les sites sont choisis en considérant les données et les recommandations des représentants des professionnels de la pêche. Ces échanges permettent d'identifier les zones où l'activité de pêche est la moins importante.

La connaissance approfondie des activités de pêche pratiquées sur les zones retenues pour développer les parcs éoliens permet d'adapter les configurations des parcs afin de favoriser la coactivité, que ce soit pour la navigation des navires ou le déploiement des engins de pêche. À titre d'exemple, le préfet maritime a considéré, avant la construction du parc de Saint-Nazaire, que l'espacement et les alignements des mâts des éoliennes étaient suffisants pour permettre la navigation des navires de pêche et la reprise de certaines activités de pêche (à l'exception des arts traînants – drague, chaluts, lignes, etc.). Les parcs actuellement en construction disposent de caractéristiques techniques semblables (alignement, espacement) et les orientations en matière de réglementation des usages sont identiques, à savoir une volonté de l'État et des parties prenantes de maintenir les activités de pêche au sein des parcs éoliens en mer.

Les effets sur la pêche se concentrent principalement durant la phase d'installation du parc et de son raccordement puisque la pêche y est alors temporairement interdite. Des indemnités sont versées aux pêcheurs pour compenser les pertes d'exploitation engendrées. Ces indemnités sont calculées de façon similaire sur l'ensemble des projets, sur la base d'une méthodologie développée par des économistes des pêches de l'université de Nantes.

Les pêcheurs sont destinataires de 35% de la taxe sur l'éolien en mer dans les eaux territoriales (voir Question 5.6). Ce montant est affecté aux comités des pêches maritimes et des élevages marins pour le financement de projets concourant au développement durable de la pêche et des élevages marins.



Comment les professionnels de la pêche sont-ils associés à la réalisation des parcs ?

La réalisation des parcs éoliens en mer exige une attention particulière pour les enjeux halieutiques afin de garantir la bonne cohabitation des usages. À ce titre, un dialogue continu est mis en place avec les professionnels de la pêche qui sont associés à chaque étape de réalisation du parc.

EN PHASE DE DÉVELOPPEMENT ET DE CONSTRUCTION :

- ▶ des instances de concertation dédiées et un dialogue permanent avec la profession sont mises en place et permettent, entre autre, d'identifier les zones à moindre impact pour le secteur et d'adapter les caractéristiques du parc pour faciliter la pratique de la pêche professionnelle (ex : alignement des éoliennes dans le sens du courant) ;
- ▶ le secteur de la pêche collabore à la réalisation des études de site et de suivi de la ressource halieutique et des campagnes en mer ;
- ▶ en phase de chantier, des compensations financières sont mises en place pour pallier l'impact sur l'activité liée à la restriction d'accès à la zone.

EN PHASE D'EXPLOITATION :

- ▶ les études de suivi de la ressource halieutique se poursuivent ;
- ▶ les règles de pêche pour favoriser la cohabitation sécurisée des usages sont co-définies avec la profession ;
- ▶ le dialogue est maintenu pendant toute la durée d'exploitation avec les comités départementaux et régionaux des pêches.

4.7.

Les parcs éoliens en mer ont-ils un impact sur le tourisme ?

L'ensemble des activités de tourisme se concentre majoritairement sur le littoral ou la bande côtière. L'implantation de parcs éoliens en mer, éloignés des côtes, n'a pas d'impact sur la fréquentation touristique du site, comme le montrent les retours d'expérience.

Un parc éolien peut même constituer un nouveau centre d'intérêt touristique. Dans plusieurs pays d'Europe, des visites de parc en bateau sont organisées renforçant le tourisme local. C'est par ailleurs le cas pour le parc du banc de Thornton, à 30km du port d'Ostende (Belgique) ; les parcs de Horns Rev 1 & 2 (Danemark) ou encore le parc de Thanet situé à 12 km au large des côtes du Kent (Royaume-Uni).

C'est aussi le cas pour le parc de Saint-Nazaire où des visites de la base de maintenance ainsi que du parc lui-même ont été organisées notamment depuis le Port de La Turballe / Le Croisic pendant l'été 2023, et reconduites pour l'été 2024 (NAVIX.fr).

En France, le centre éolien Eol à Saint-Nazaire a déjà accueilli plus de 40 000 visiteurs en 2023.





CHAPITRE 5.

QUELS SONT LES ENJEUX SOCIO- ÉCONOMIQUES DE L'ÉOLIEN EN MER ?

5.1.

Les composants des parcs éoliens en mer sont-ils fabriqués en France ?

Dans notre pays, le développement de l'éolien en mer a donné naissance à une filière industrielle d'excellence ancrée dans les territoires.

La France compte aujourd'hui quatre usines, soit $\frac{1}{3}$ des usines du secteur en Europe. Elles fabriquent les éoliennes des premiers parcs en mer installés ou à installer au large des côtes françaises :

► **Une usine de nacelles d'éoliennes à Saint-Nazaire** qui produit depuis 2014 et qui a déjà étendu son site de production (800 emplois directs et 200 personnes supplémentaires en cours de recrutement, plus 400 emplois directs à Nantes pour les fonctions support : centre d'ingénierie, gestion de projets, sourcing...)

► **Une usine de pales d'éoliennes à Cherbourg** en service depuis 2018 (750 emplois directs).

► **Deux usines de pales et de nacelles au Havre**, en service depuis 2022 (1100 emplois directs en 2023)

De nombreuses entreprises françaises ou implantées en France contribuent au développement de la filière. Ainsi :

► **Les Chantiers de l'Atlantique construisent des postes électriques en mer ;**

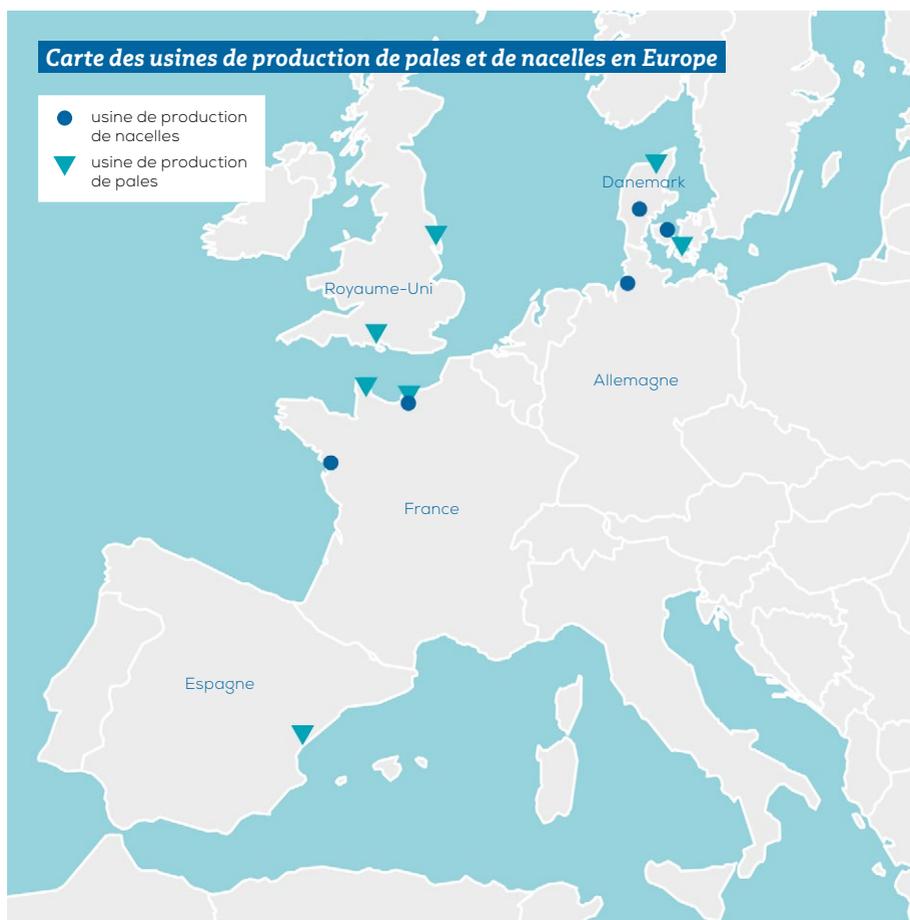
► **De grands groupes français du BTP (Eiffage, Bouygues TP) réalisent les fondations ;**

► **Des câblers implantés en France (Prysmian, Nexans) fabriquent les câbles de raccordement pour les travaux de génie civil à terre.**

Les écosystèmes portuaires comme Le Havre, Brest, Port-La-Nouvelle, Cherbourg, Fos-sur-mer, La Rochelle et de nombreuses PME locales sous-traitantes bénéficient de ces nouvelles opportunités.

Les éoliennes installées ou en cours d'installation au large des côtes françaises ont à ce jour été produites par des usines localisées en Europe, indiquées sur la carte ci-après.

Carte des usines de production de pales et de nacelles en Europe



Les entreprises en lien avec l'éolien en mer en France servent également le marché international. Depuis leur mise en service, elles ont exporté leur production au Royaume-Uni, aux États-Unis, en Allemagne et en Chine. **Les activités d'export représentaient 28 % du chiffre d'affaires de la filière en 2022, soit 543M€, répartis en 164 projets,** essentiels pour pérenniser l'activité de ces usines et sites industriels.

Les acteurs de l'éolien en mer ont signé avec le Gouvernement en mars 2022 un « **Pacte éolien en mer** » à travers lequel la filière s'engage à atteindre, d'ici 2035, un contenu local à hauteur de 50%, calculé sur l'ensemble des coûts du projet, au moment de sa mise en service, pour chacun des projets.

5.2.

Combien l'éolien en mer crée-t-il d'emplois ?

Le développement des énergies renouvelables crée de nombreux emplois, en France et en Europe : en 2023, la filière de l'éolien en mer représentait 8 300 équivalents temps plein (ETP) directs dans notre pays, alors que la construction des premiers parcs éoliens en mer avait à peine débuté.

De même, les 6 clusters et groupements d'entreprises régionaux spécialisés (Bretagne Ocean Power, Neopolia pour les Pays de la Loire, Normandie Maritime, Aquitaine Blue Energies, Wind'Occ pour l'Occitanie et SudEole pour la Région Sud) sont regroupés depuis 2023 sous la bannière commune « France Offshore Renewables ». Ce groupement représente **un réseau de plus de 500 entreprises françaises couvrant l'ensemble de la chaîne de valeur nationale de l'éolien en mer et facilitant l'accès pour les PME françaises aux marchés internationaux.**

Pour la réalisation des prochains parcs, les professionnels se sont engagés, à travers Le Pacte éolien en mer, à **mobiliser 20 000 personnes à horizon 2035.**

La filière nécessite des savoir-faire multiples, issus du maritime, de l'énergie, de la métallurgie, du BTP, de l'industrie pétrolière, de l'environnement ou d'autres spécifiques à l'éolien en mer.

8 300 ETP
NOMBRE D'EMPLOIS DANS
LE SECTEUR DES ÉNERGIES
MARINES RENOUVELABLES
EN FRANCE EN 2023²⁶



COMMENT LES PERSONNES INTÉRESSÉES PEUVENT-ELLES SE FORMER OU SE RECONVERTIR POUR ACQUÉRIR LES COMPÉTENCES NÉCESSAIRES AUX MÉTIERS DE LA FILIÈRE ÉOLIENNE EN MER ?

- ▶ Des formations propres à l'éolien existent à tous les niveaux, du bac professionnel à l'école d'ingénieurs en passant par les formations continues longue durée.
- ▶ Des formations pour des profils mobilisables pour la sous-traitance du secteur des éoliennes en mer sont aussi mises en œuvre, notamment dans les domaines de la métallurgie, du soudage, de la chaudronnerie et de l'électricité.
- ▶ Industriels et bureaux d'études sont impliqués dans les processus de formation et mettent en place des partenariats avec les lycées, les universités et les centres de formation. Ils participent au financement de la formation et offrent des opportunités de stages et d'emplois.
- ▶ Dans le cas particulier des usines de fabrication de pales, les entreprises mettent en œuvre leurs propres formations sur site.
- ▶ De nombreuses formations sont parrainées par des régions françaises.
- ▶ Les centres de formation sont principalement localisés près des parcs de production.
 - ▶ En Normandie, par exemple, le Conseil régional accompagne les projets de recrutement en finançant des formations individuelles ou collectives adaptées aux besoins des entreprises. Trois Campus des Métiers des Qualifications (CMQ) y ont été labellisés. Les campus des métiers et des qualifications « Industrie des énergies » à Cherbourg et « Énergies et efficacité énergétique » (CMQ3E) à Fécamp accueillent des étudiants depuis 2013. En février 2017, le Campus de métiers et des qualifications « Pôle normand des métiers de la mer », porté par le Conservatoire national des arts et des métiers, a été labellisé.
 - ▶ En Bretagne, l'Agence nationale pour la formation professionnelle des adultes (Afp) de Lorient a lancé, en 2018, un dispositif de formation dédié à l'éolien en mer et aux métiers de la maintenance.

5.3.

Quel est le coût d'un parc éolien en mer et qui le finance ?

Les coûts d'un projet éolien en mer comprennent les dépenses d'investissement (développement du projet, études, construction des éoliennes et des fondations, installation du parc, raccordement), de fonctionnement (exploitation et maintenance) et de démantèlement. Ils varient selon la ressource en vent, la distance entre le parc et la côte, la profondeur et la nature des fonds marins, et les choix technologiques.

Le financement du parc est assuré par l'opérateur en charge du projet, mais le coût des infrastructures nécessaires au raccordement du parc est pris en charge par le gestionnaire de réseau RTE. Il varie sensiblement en fonction de la distance totale de raccordement (maritime et terrestre) et de la puissance du parc.

Les ouvrages construits par RTE sont financés par le tarif d'utilisation du réseau public de transport d'électricité (TURPE²⁷).

Le coût total d'un parc éolien de 1000MW est estimé entre 2 et 4 milliards d'euros.

Répartition des coûts d'un parc éolien en mer

8%

Coûts de développement

réalisation des études préalables

70%

Coûts d'investissement

achat des machines, des fondations, réalisation des travaux terrestres et sous-marins

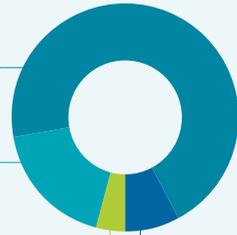
18%

Coûts de fonctionnement

entretien des machines et paiement des taxes

4%

Coûts de démantèlement



27. Avec l'ouverture à la concurrence du marché de l'électricité, les pouvoirs publics ont instauré un tarif d'utilisation du réseau public d'électricité (TURPE)

5.4.

Combien coûte l'électricité produite par un parc éolien en mer ?

Pour comprendre la définition du coût de l'énergie éolienne en mer, il faut connaître les coûts de production de l'énergie. Il faut également estimer la production du parc, qui dépend essentiellement de la ressource en vent disponible sur la zone géographique. Le ratio entre les coûts et la production d'énergie déterminera le prix de l'électricité produite par le parc.

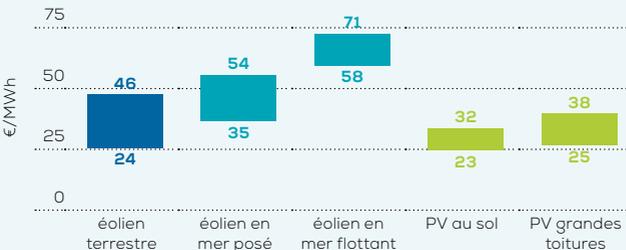
Le coût de production de l'éolien en mer a beaucoup diminué ces dernières années en Europe, grâce aux évolutions technologiques, à l'industrialisation de la filière, à la diminution des risques et des coûts de financement.

Les derniers appels d'offres ont été remportés à 44,9€/MWh₂₀₂₃ (posé) et 86,45€/MWh₂₀₂₄ (flottant), ce qui démontre la compétitivité de la filière qui travaille par ailleurs pour renforcer les critères non financiers dans le cadre des discussions en cours aux niveaux européen et français.

Le coût moyen de production d'énergie nucléaire est compris entre 59,8€/MWh et 109€/MWh selon qu'il s'agisse d'une ancienne ou d'une nouvelle centrale non encore amortie²⁸. Le coût moyen de production d'énergie thermique issue du gaz s'élève entre 70€/MWh et 100€/MWh²⁹.

LCOE²⁹ des filières d'électricité renouvelable 2050

Sources : ADEME



28. Source : Cour des comptes

29. Source : EDF

30. Le coût actualisé de l'énergie, en anglais Levelized Cost of Energy (LCOE), correspond au prix complet d'une énergie (l'électricité dans la plupart des cas) sur la durée de vie de l'équipement qui la produit.

Pourquoi et comment les pouvoirs publics soutiennent-ils les projets éoliens en mer ?

Comme pour toute infrastructure énergétique, l'État apporte son soutien au développement de l'éolien en mer en France.

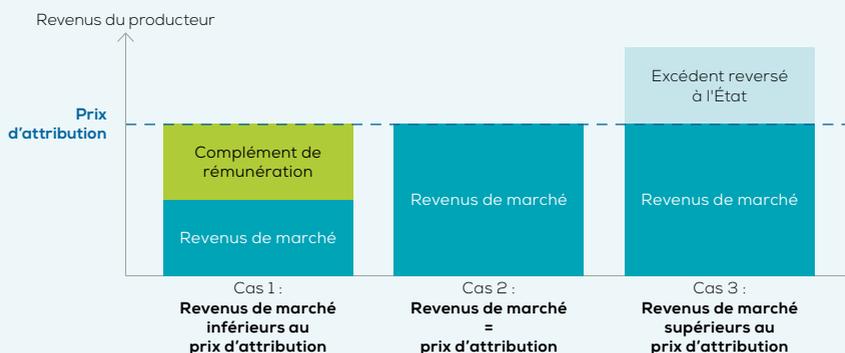
Les installations éoliennes en mer se caractérisent par des investissements considérables et doivent se rémunérer par la vente d'électricité. Le prix de l'électricité, qui fluctue très largement et est peu prévisible sur de longues périodes, ne permet pas d'offrir la visibilité nécessaire aux investisseurs pour financer les projets.

Ces investissements sont pourtant indispensables à la transition énergétique. Aussi, l'État a-t-il mis en place un dispositif de soutien pour permettre la concrétisation de ces projets. Il s'agit d'un complément de rémunération, articulé autour du prix nécessaire à la réalisation de l'investissement.

Dans le cadre des appels d'offres, le producteur indique à l'État le prix qui lui permettra de réaliser l'investissement. Il vend ensuite l'électricité produite sur le marché.

- ▶ Lorsque le prix du marché de l'électricité est inférieur au prix d'appel d'offres, **l'État verse un complément de rémunération au producteur.**
- ▶ Lorsque le prix de marché est égal au prix d'appel d'offres, **l'État ne verse rien.**
- ▶ Lorsque le prix de marché est supérieur au prix d'appel d'offres, **le producteur reverse la différence avec le prix d'attribution à l'État.** Dans cette situation, sur la durée du soutien, de 15 à 20 ans, les installations éoliennes en mer pourront contribuer positivement au budget de l'État.

Mécanisme du complément de rémunération



Pour le parc éolien en mer de Dunkerque, la Commission de régulation de l'énergie (CRE) estime que le coût de soutien public s'élèvera au maximum à 540 M€. Elle estime également qu'en fonction de l'évolution du prix de l'électricité sur les 20 prochaines années, la production électrique du parc pourrait, via le mécanisme de complément de rémunération, conduire le producteur à reverser jusqu'à 266 M€ à l'État. Pour le parc éolien de Normandie (AO4) attribué en mars 2023 et dont la mise en service est prévue en 2031, la CRE estime que le lauréat pourrait reverser sur les 20 ans du contrat entre 0,5 et 4,8 Mds à l'État (source CRE, délibération n°2023-77).

5.6.

Quels sont les bénéfices économiques pour les communes et acteurs locaux ?

Au-delà des retombées économiques liées à l'activité des chantiers et de l'exploitation des parcs, les collectivités et acteurs locaux bénéficient d'une taxe annuelle sur les installations de production éolienne en mer. Cette taxe est acquittée tous les ans par l'exploitant dès l'année suivant la mise en service du parc.

Pour 2023, le tarif annuel de la taxe est fixé à 19405€ par mégawatt installé. Ce montant est revalorisé chaque année, soit plus de 9,7 millions d'euros pour un parc de 500MW.

Outre cette taxe, les communes et territoires proches des parcs bénéficient de l'attractivité de la zone et des revenus liés à l'implantation d'usines, la revalorisation d'activités existantes, d'infrastructures et de la création de nouveaux emplois.

Affectation de la taxe annuelle sur les installations de production éolienne en mer

Source : Ministère de la transition écologique
<https://www.ecologie.gouv.fr/eolien-en-mer-0#e4>

50% Communes littorales d'où les installations sont visibles

selon la distance qui sépare les communes des installations et la population des communes

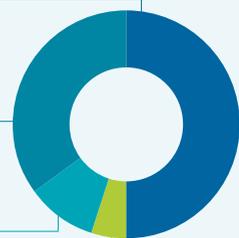
35% Comités des pêches maritimes et élevage marins

pour le financement de projets concourant au développement durable de la pêche et des élevages marins

10% Office français de la biodiversité

à l'échelle de la façade maritime

5% Société nationale de sauvetage en mer





Crédits photos : MEDVIND / Bent Sørensen (pages 6-36-37-42-46) - General Electric / CAPA / Christophe Beyssier (page 18) - Cyrille Pawloski (page 26) - SAIPEM (pages 36-37) - Ulrich Wirrwa (pages 36-37) - Van Oord (pages 36-37) - Ailes Marines (pages 36-37-53) - Ailes Marines / Christophe Beyssier (pages 36-37) - Valéry Joncheray (pages 36-37) - Tim Fox (pages 40-41) - Dong Energy (page 43) - iStock (pages 67-71-77) - EDF Renouvelables / Tim Fox (page 68) - General Electric / Jean-Luc Petit (page 80) - Siemens Gamesa Renewable energies (page 91)

Conception graphique : THINK UP • Illustrations : iStock / Montreuil Graphisme / THINK UP

© SER • Mai 2024



40-42, rue La Boétie, 75008 PARIS
T. 01 48 78 05 60 • contact@enr.fr
www.enr.fr • www.ser-evenements.com

 Syndicat des énergies renouvelables
 [les_energies_renouvelables](https://www.instagram.com/les_energies_renouvelables)