



Quelles sont les grandes caractéristiques d'un parc éolien en mer posé ?

Principaux points abordés :

Cette fiche décrit les principales caractéristiques d'un parc d'éoliennes en mer posées. Elle présente :

- Les principales composantes d'un parc éolien en mer posé, à savoir l'éolienne et les fondations,
- Les grandes étapes d'un parc éolien en mer, de sa conception à son exploitation (le démantèlement est traité en [fiche 12 – Comment se fait le démantèlement d'un parc éolien posé et de son raccordement ?]),
- Les principales caractéristiques à décider du projet éolien en mer en Sud-Atlantique et le choix de la puissance cible.

1. Les principales composantes d'une éolienne

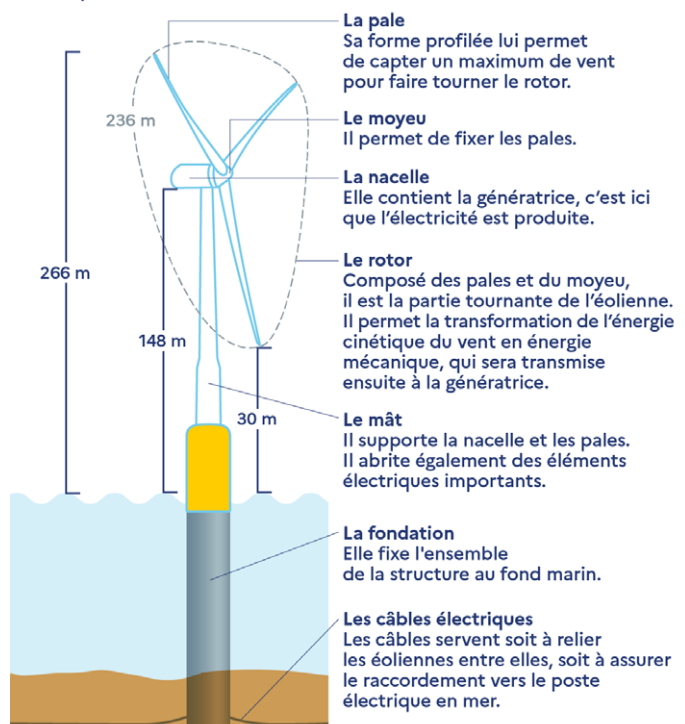
1.1 Présentation d'une éolienne

Une éolienne est constituée d'un mât, d'une nacelle et de pales. En mer, elle peut soit être posée sur le fond marin (technologie posée), soit reposer sur une base flottante ancrée aux fonds marins (technologie flottante). Compte tenu de la profondeur des fonds marins de la zone d'étude choisie sur la façade Sud-Atlantique (moins de 50 mètres), le projet éolien en mer en Sud-Atlantique utilisera la technologie posée.

La puissance d'une éolienne est proportionnelle à la surface balayée par ses pales : plus le diamètre de l'éolienne est grand, plus elle peut produire d'électricité. Par conséquent, pour une puissance totale donnée, plus les éoliennes sont grandes et moins elles sont nombreuses. Par exemple, pour réaliser un parc de 1000 MW, 125 éoliennes sont nécessaires avec des modèles produisant 8 MW, alors que 78 éoliennes sont nécessaires avec des modèles de 13 MW et 67 avec des modèles de 15 MW.

La surface totale occupée dans ces trois cas de figure resterait globalement identique, car l'espacement entre les éoliennes doit être d'autant plus grand que les éoliennes sont hautes et puissantes. Cette même surface serait cependant composée d'un nombre bien plus faible d'obstacles, nécessitant moins de travaux d'implantation et d'artificialisation sur les fonds marins.

Description des éléments d'une éolienne posée Exemple du modèle Vestas V236-15.0 MW



La pale

Sa forme profilée lui permet de capter un maximum de vent pour faire tourner le rotor.

Le moyeu

Il permet de fixer les pales.

La nacelle

Elle contient la génératrice, c'est ici que l'électricité est produite.

Le rotor

Composé des pales et du moyeu, il est la partie tournante de l'éolienne. Il permet la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, qui sera transmise ensuite à la génératrice.

Le mât

Il supporte la nacelle et les pales. Il abrite également des éléments électriques importants.

La fondation

Elle fixe l'ensemble de la structure au fond marin.

Les câbles électriques

Les câbles servent soit à relier les éoliennes entre elles, soit à assurer le raccordement vers le poste électrique en mer.

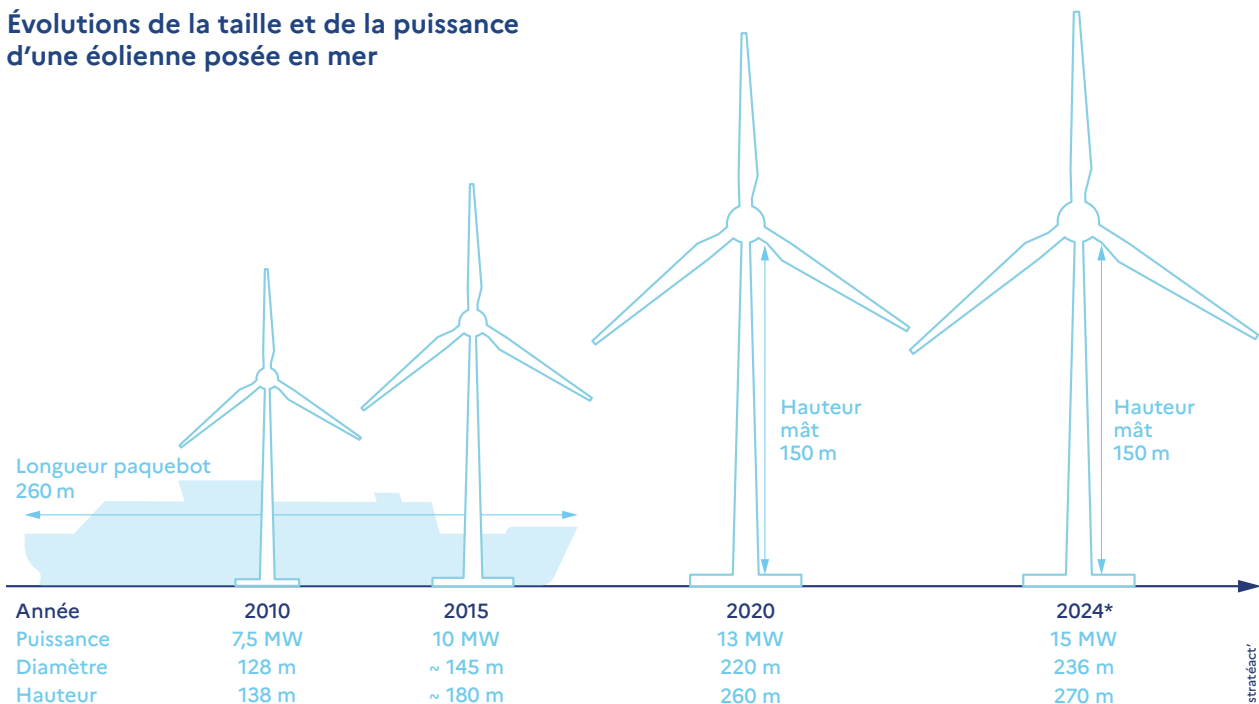
NB : il existe différents types de fondations décrits plus loin.

Source : Vestas

En France, les premiers parcs éoliens en mer posés [voir fiche 6 – *Quel est l'état d'avancement des énergies renouvelables en mer ?*] d'une puissance cible maximale de 500 MW occuperont chacun une superficie de l'ordre de 50 km² à 80 km², comprenant 60 à 80 éoliennes, espacées les unes des autres d'environ un kilomètre. Par exemple, le parc éolien en mer posé de Fécamp d'une puissance installée de 497 MW comprendra 71 éoliennes pour une superficie de 60 km².

Les progrès technologiques ont été particulièrement rapides dans l'industrie de l'éolien en mer, ce qui se reflète principalement par la hausse de la puissance des éoliennes, comme l'illustre l'infographie suivante. Cette hausse permet de produire plus d'énergie par éolienne, ce qui a permis une forte baisse des coûts de l'éolien en mer. Cette hausse des puissances, amenée à se poursuivre, ne permet pas de décrire précisément le projet de parc à ce jour en termes de nombre d'éoliennes, de hauteur et de distance inter-éoliennes.

Évolutions de la taille et de la puissance d'une éolienne posée en mer



*Les dimensions représentées correspondent à celles de la plus grande éolienne annoncée à ce jour : l'éolienne de Vestas V236-15.0 MW.

Les perspectives d'évolution de puissance et de taille des éoliennes dans les années à venir restent difficilement prévisibles.

Source : DGEC

1.2 Les trois principaux types de fondations

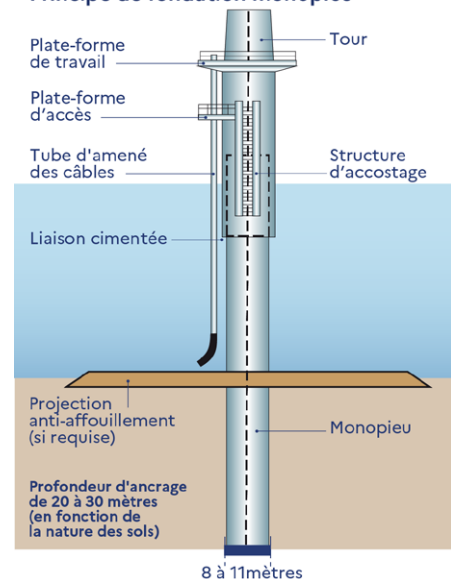
Le mât de l'éolienne est installé sur une fondation, elle-même fixée au fond marin. La fondation doit résister aux efforts du vent, de la houle et des courants marins.

Trois principaux types de fondations sont utilisés pour les éoliennes posées : le monopieu, l'embase gravitaire ou le jacket. Le type de fondation est choisi en fonction des caractéristiques physiques du site d'implantation.

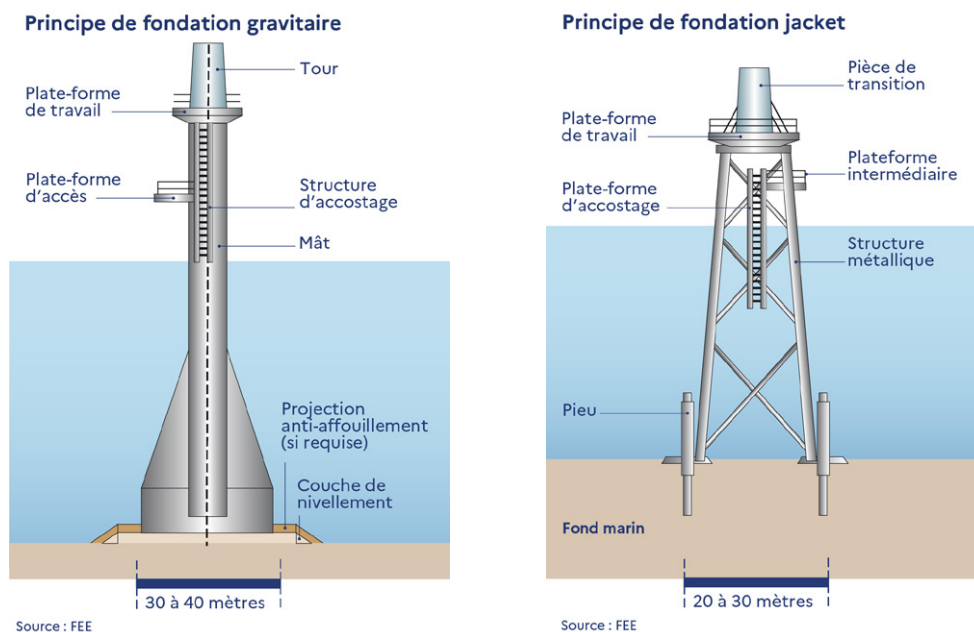
Principe de fondation monopieu

La fondation est constituée d'un pieu métallique enfoncé dans le fond marin par battage à l'aide d'un marteau hydraulique et/ou par forage. Le diamètre du pieu est de l'ordre de 10 m pour une éolienne de 13 MW. Ce type de fondation est adapté aux terrains sédimentaires (sables et argiles) et répandu en mer du Nord. En France, les parcs éoliens en mer de Courseulles-sur-Mer, Saint-Nazaire et Yeu-Noirmoutier vont disposer de fondations monopieu.

Principe de fondation monopieu



Source : FEE



Principe de fondation gravitaire

La fondation gravitaire est constituée d'une large structure en béton ou en acier, posée sur le fond marin afin d'assurer la stabilité de l'éolienne. Son diamètre peut atteindre jusqu'à 30 mètres au niveau du sol marin et sa masse est de l'ordre de 2500 tonnes pour une éolienne de 13 MW. Elle peut cependant être construite de façon plus légère puis remplie d'eau sur place, allégeant ainsi la structure initiale, comme cela est le cas pour le parc de Fécamp.

Principe de fondation jacket

La fondation métallique (ou jacket) est constituée d'un treillis métallique fixé sur le fond marin. Cette fondation repose généralement sur trois ou quatre pieds, ancrés au sol marin par des pieux battus et/ou forés, d'un diamètre de l'ordre de 2,5 m par pieu pour une éolienne de 13 MW. Le parc éolien en mer de Saint-Brieuc a notamment disposer de ce type de fondation.

1.3 Les câbles électriques inter-éoliennes

Les éoliennes, à l'intérieur d'un parc, seront reliées entre elles et raccordées à un poste électrique en mer par des câbles électriques installés par le développeur du parc.

Un câble électrique sous-marin inter-éoliennes est constitué de trois conducteurs en cuivre ou en aluminium, chacun gainé par un matériau hautement isolant, le polyéthylène réticulé, permettant une utilisation jusqu'à un niveau de tension de 66 kV. Une armure extérieure constituée notamment d'une tresse en acier galvanisé, servant à protéger le câble, regroupe les trois conducteurs et un faisceau de fibres optiques pour former un câble d'un seul tenant. Les fibres optiques permettent de créer un réseau de communication entre les éoliennes et le poste de livraison. Ces câbles sont ensouillés (enfouis) dans le sol en priorité. Si l'ensouillage n'est pas possible, les câbles sont déposés sur le fond marin et protégés par des enrochements ou des matelas en béton.

2. Les étapes de la vie d'un parc éolien en mer

2.1 La conception du parc éolien en mer

La conception d'un parc éolien en mer va de pair avec l'acquisition de données techniques sur le site (houle, courant, vent, caractéristiques du sol). Une partie de ces campagnes de mesures sont réalisées par l'État avant l'attribution du parc un développeur éolien. Des compléments pourront être réalisés par le développeur par la suite.

Les études de conception des éoliennes et de leurs fondations sont confiées par le développeur à des entreprises d'ingénierie spécialisées. Celles-ci vont réaliser de multiples campagnes de mesures en bassin, calculs et simulations en toutes conditions de mer et de vent, permettant de fixer les caractéristiques des éoliennes et des fondations retenues. Des plans sont alors envoyés pour fabrication à des usines de fabrication de fondations ainsi qu'à des usines de fabrication de mâts, de nacelles et de pales.

2.2 La construction du parc éolien en mer

L'assemblage des différents éléments qui composent une éolienne en mer posée (fondations, mât, nacelle et pales) est réalisé en partie à terre et en partie en mer.

Les fondations sont généralement construites dans des usines et préassemblées dans des ports, d'où elles partiront pour être installées en mer. Afin de mener à bien ces opérations, des aménagements des ports (renforcement des sols, espaces d'entreposage dédiés) sont parfois nécessaires du fait de leur poids et de leurs tailles. Les fondations sont habituellement transportées vers leur lieu d'implantation sur un navire auto-élévateur ou une barge auto-élévatrice. Il s'agit de bateaux avec une capacité d'auto-élévation au-dessus du niveau de l'eau qui assure la stabilité des opérations. Le levage des fondations nécessite des grues spécifiques de forte capacité. Si le navire ou la barge transportant les fondations n'est pas équipé(e) d'une telle grue, un autre navire qui en est équipé se charge du levage.

Les fondations gravitaires sont déposées sur les fonds marins après une préparation du sol nécessitant généralement un aplanissement. Les fondations de types monopieu et jacket nécessitent l'installation de pieux (de diamètre nettement plus faible pour les jackets) enfoncés dans le sous-sol marin. Selon les caractéristiques du sol, cette installation s'effectue soit par forage (des trous sont creusés dans le sol s'il est particulièrement dur), soit par battage (si le sol est plus friable et permet d'enfoncer des pieux à l'image de clous enfoncés par un marteau). Le navire qui a assuré le transport des pieux et leur levage réalise également les opérations d'installation dans le sous-sol.

Une fois les fondations installées, les autres composantes de l'éolienne (le mât, la nacelle et le rotor, les pâles) sont acheminées jusqu'au lieu des fondations, également via un navire auto-élévateur.

En fonction du type d'installation retenue, une éolienne peut se composer de sept parties distinctes à assembler (les trois tronçons du mât, la nacelle assemblée au rotor, les trois pales). Afin de limiter le nombre et la complexité des opérations se déroulant en mer, les trois tronçons du mât sont en général assemblés à terre. Le mât, la nacelle, le rotor et les trois pales de l'éolienne sont ensuite transportés jusqu'aux fondations, où le navire s'auto-élève au-dessus du niveau de la mer. Les opérations de levage des composantes de l'éolienne (le mât, la nacelle et son rotor, les trois pâles) nécessitent également des grues de forte capacité et de grande taille. Une fois l'opération terminée, le navire se remet en position de navigation et se déplace jusqu'aux fondations suivantes pour renouveler l'opération.

Les caractéristiques d'un navire auto-élévateur d'installation d'éoliennes (type « jack-up ») sont les suivantes :

- Longueur : environ 150 mètres;
- Largeur : environ 45 mètres;
- Système d'auto-élévation permettant au navire de s'élever 10 à 20 mètres au-dessus de l'eau, à une profondeur d'eau de 30 mètres ou plus;
- Capacité de chargement : environ 7 000 tonnes.

Installation du parc de Dudgeon au Royaume-Uni



Ces navires aux importantes dimensions sont très peu nombreux et très coûteux dans leur mobilisation.

Les éoliennes, à l'intérieur d'un parc, sont reliées entre elles et raccordées à un poste électrique en mer par des câbles électriques installés par le producteur.

2.3 L'exploitation et la maintenance d'un parc éolien en mer

L'exploitation et la maintenance des parcs sont réalisées pendant toute la durée de vie du parc (25 à 30 ans environ), depuis la mise en service des installations jusqu'au démantèlement.

Elles sont assurées depuis une base portuaire de maintenance située préférentiellement à proximité immédiate du parc, qui doit être accessible 24h/24 et 7j/7 en cas d'urgence.

La liaison entre le port et les éoliennes se fait par des navires spécialisés (navires de transport de personnel) disposant d'une étrave (pièce saillante qui forme la proue d'un navire) adaptée permettant un transfert sécurisé des techniciens du navire vers l'éolienne et vice-versa ou de systèmes de passerelles s'adaptant aux mouvements du bateau. En cas d'urgence, un transfert par hélicoptère est possible.

La durée de vie d'un parc éolien en mer dépend de ses caractéristiques et des conditions climatiques auxquelles il fait face. Il existe encore peu de retours d'expérience, mais les industriels estiment que les installations pourront fonctionner au moins 30 ans avant d'être démantelées. Le premier parc en mer installé au monde, à Vindeby au Danemark, a été exploité pendant 26 ans avant d'être démantelé en 2017.

2.4 Le démantèlement d'un parc éolien en mer

Pour le démantèlement, [\[voir la fiche 12 – Comment se fait le démantèlement d'un parc éolien posé et de son raccordement ?\]](#) dédiée au sujet.

3. Quelles seraient les grandes caractéristiques d'un parc éolien en mer posé en Sud-Atlantique ?

Le débat public porte sur la recherche d'une zone préférentielle pour un premier parc éolien en mer posé, d'une puissance comprise entre 500 et 1000¹ MW, qui fera l'objet d'une procédure de mise en concurrence à partir de 2022 comme le prévoit la Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE). Le débat public prévoit également un éventuel deuxième parc, d'une puissance pouvant aller jusqu'à 1000 MW, qui pourra faire l'objet d'une procédure de mise en concurrence à partir de 2024.

¹ 1000 MW (mégawatts) équivaut à 1 GW (gigawatt).

Depuis la réforme de 2018, compte-tenu de la participation du public à un stade précoce du projet, le débat public ne porte pas sur un projet précis. Les caractéristiques générales du projet éolien en mer sont exposées ici afin d'éclairer le public sur le dimensionnement et le processus d'élaboration du projet, et notamment en prenant l'exemple d'un projet d'un parc éolien en mer de 1 GW.

Pourquoi viser une puissance cible importante ?

Les premiers parcs éoliens en mer en cours de développement ont des puissances de 500 MW environ. Désormais, à l'image du projet de parc éolien en Normandie et du futur projet en Sud-Atlantique, la puissance cible des projets éoliens en mer posés tend vers 1 GW.

Les procédures de mise en concurrence pour des parcs de grande puissance deviennent la norme en Europe. L'Allemagne prévoit par exemple d'autoriser des parcs de 840 MW chaque année de 2021 à 2025, et le Danemark prévoit systématiquement des projets de 800 MW chacun. Cette évolution vers des parcs plus grands s'explique par plusieurs facteurs : des effets d'échelle, une meilleure fiabilité de la technologie, une amélioration des conditions de financement, un modèle économique basé sur de forts coûts d'investissement, et une optimisation du raccordement.

L'industrie de l'éolien nécessitant des investissements très importants avant de produire des revenus, elle est sensible aux effets d'échelle : le coût par éolienne installée est moindre pour un parc de 1 GW que pour un parc de 500 MW, ce qui diminue d'autant le besoin de soutien public par MWh produit. Il est ainsi plus intéressant économiquement de faire des parcs plus grands.

Les technologies utilisées pour les parcs éoliens en mer sont connues et mieux maîtrisées, permettant de construire des parcs plus importants et plus éloignés des côtes. Les retours d'expérience des parcs en mer à l'étranger ont notamment permis de démontrer leur fiabilité technologique puisqu'ils tiennent leurs objectifs, tant de production électrique que de rentabilité économique.

Les conditions de financement des parcs éoliens en mer sont plus avantageuses : les banques sont plus susceptibles de prêter à des projets qui ont prouvé par le passé qu'ils étaient relativement peu risqués. À cela s'ajoutent des taux d'intérêts qui ont baissé au cours des dernières années.

En termes de raccordement, il est moins coûteux de raccorder un seul parc de 1 GW plutôt que deux parcs de 500 MW, par effet d'échelle et de mutualisation.

Sur le plan de l'empreinte environnementale du raccordement, il est préférable de construire un parc de 1 GW plutôt que deux parcs de 500 MW, principalement du fait de la mutualisation des ouvrages de raccordement : avec un raccordement en courant continu, il n'y aura qu'une seule sous-station installée en mer, un seul tracé de câble, un seul atterrissage, un seul poste à terre pour un parc de 1 GW. Si un deuxième parc d'une capacité pouvant aller jusqu'à 1 GW implanté à côté du premier parc était planifié, le raccordement pourrait alors être mutualisé. Il y aurait deux stations de conversion, en terre et en mer, mais pas de poste de compensation ainsi qu'un nombre de câbles moins élevé qu'en courant alternatif. La planification d'un deuxième parc permettrait de réduire les impacts environnementaux du raccordement.

D'un point de vue paysager, si un parc plus important peut être plus visible, il se concentre sur une zone plus restreinte que deux parcs plus petits. Le principal impact en termes de visibilité portera surtout sur l'alignement des éoliennes par rapport à certains points de vue remarquables, qui sont des facteurs plus déterminants que la taille du parc en elle-même.

L'ensemble de ces facteurs technico-économiques incite les acteurs publics et les industriels à lancer aujourd'hui des projets éoliens posés plus importants que les premiers projets français.

