

## QUELLES SERAIENT LES GRANDES CARACTÉRISTIQUES D'UN PARC ÉOLIEN EN MER D'1 GW AU LARGE DE LA NORMANDIE, ET DE SON RACCORDEMENT ?

Le débat public porte sur la recherche de zones préférentielles pour un projet éolien en mer posé d'1 GW qui fera l'objet d'une procédure de mise en concurrence comme le prévoit la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie, et pour d'autres projets éoliens en mer posés qui pourront ultérieurement faire l'objet de procédures de mise en concurrence.

Compte tenu de la consultation du public à un stade très amont, le débat public ne porte pas sur un projet précis puisque hormis la puissance recherchée (1 GW) les décisions sur ce projet ne sont pas encore prises. Les caractéristiques générales de projets éoliens en mer sont exposées ici afin d'éclairer le public sur le dimensionnement et le processus d'élaboration de tels projets, et notamment d'un projet d'1GW. Les nouveaux projets réalisés au large de la Normandie seraient en effet de grande puissance, 1GW pour le premier.

Les principales composantes d'un parc éolien en mer sont les éoliennes elles-mêmes, ainsi que les fondations. La réalisation d'un parc éolien en mer connaît deux grandes étapes : la construction et l'exploitation.

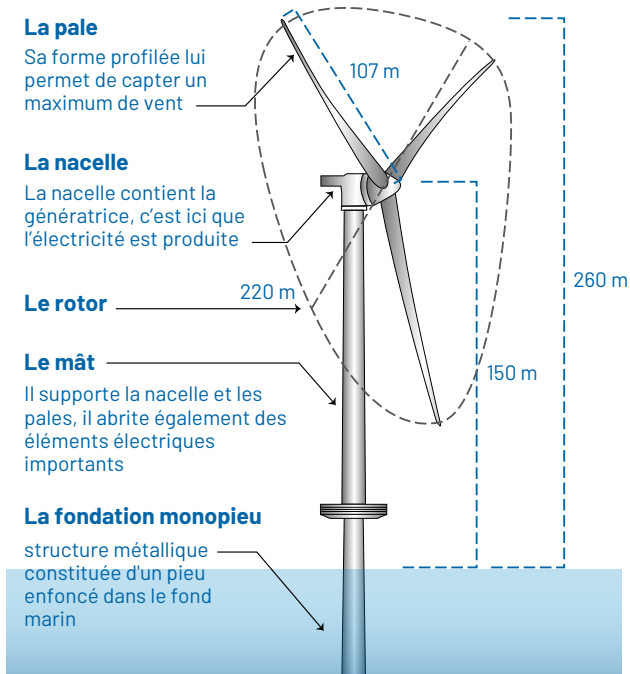
### Quelles sont les principales composantes d'un parc éolien en mer ?

#### L'éolienne

Une éolienne est constituée d'un mât, d'une nacelle et de pales (la nacelle et les pales constituant le rotor). 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 façade Manche Est-Mer du Nord (qui, en général, ne dépassent pas 50 m), les projets éoliens en mer au large de la Normandie utiliseront la technologie « posée ».

### Description des éléments d'une éolienne

Exemple de l'Haliade - X de 12 GW de General Electric



Source : General Electric

NB : il existe d'autres types de fondations, qui sont décrites plus loin.

La puissance d'une éolienne varie de manière exponentielle avec la taille de son rotor et donc avec la surface balayée par les pales. Autrement dit, plus l'éolienne est grande, plus elle peut produire d'électricité. Par conséquent, pour un parc d'une puissance totale donnée, plus les éoliennes sont grandes, moins elles sont nombreuses.

Par exemple, avec des turbines de 6 MW, 166 éoliennes seraient nécessaires pour réaliser un parc d'1 GW, alors que seulement 100 sont nécessaires avec des turbines de 10 MW, et 83 avec des turbines de 12 MW.

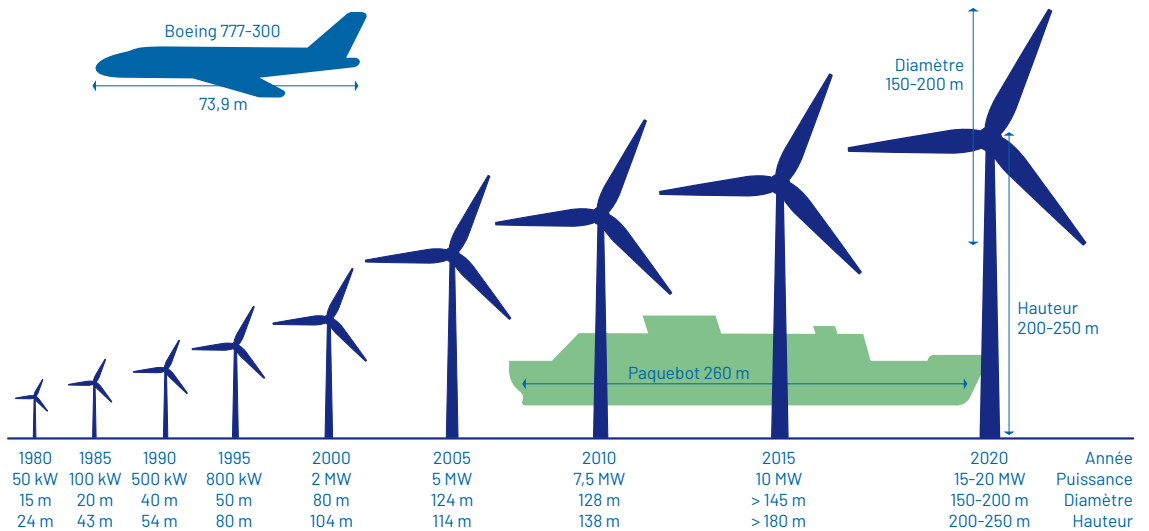
La surface totale occupée dans ces trois cas de figure resterait globalement identique, car l'espacement entre les éoliennes doit être d'autant plus grand que les éoliennes sont grandes<sup>1</sup>. Cette même surface serait cependant composée d'un nombre bien plus faible de mâts, nécessitant moins de travaux d'implantation et d'artificialisation sur les fonds marins.

En France, les premiers parcs éoliens occuperont chacun une superficie de l'ordre de 50 km<sup>2</sup> à 80 km<sup>2</sup>, comprenant 60 à 80 éoliennes, espacées les unes des autres d'environ un kilomètre.

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 le graphique suivant. Cette hausse permet de produire plus d'énergie par éolienne, ce qui a permis une forte baisse des coûts de l'éolien en mer. Pour le parc d'1 GW en Normandie, et compte tenu des progrès technologiques, les éoliennes installées auraient une puissance d'au moins 12 MW (turbine la plus puissante actuellement en développement).

1. Deux éoliennes doivent être distantes de 6 à 7 fois le diamètre de leur rotor pour éviter qu'elles ne créent trop de turbulences et « prennent » le vent des autres éoliennes, dans une logique d'optimisation de la production électrique.

## Évolution de la puissance et de la taille des éoliennes en mer



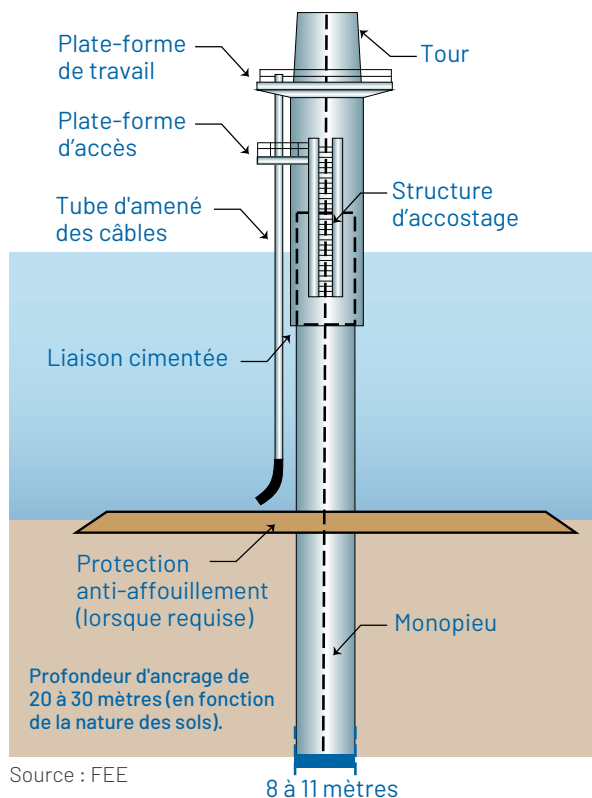
Source : Offshore Wind energy Technology

## Les fondations : 3 principaux types

La fondation d'une éolienne permet de fixer l'ensemble de la structure sur le fond marin. Le mât de l'éolienne est installé sur la fondation, qui sera elle-même posée. 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 : monopieu, gravitaire ou jacket. Le type de fondation est choisi en fonction des caractéristiques physiques du site d'implantation.

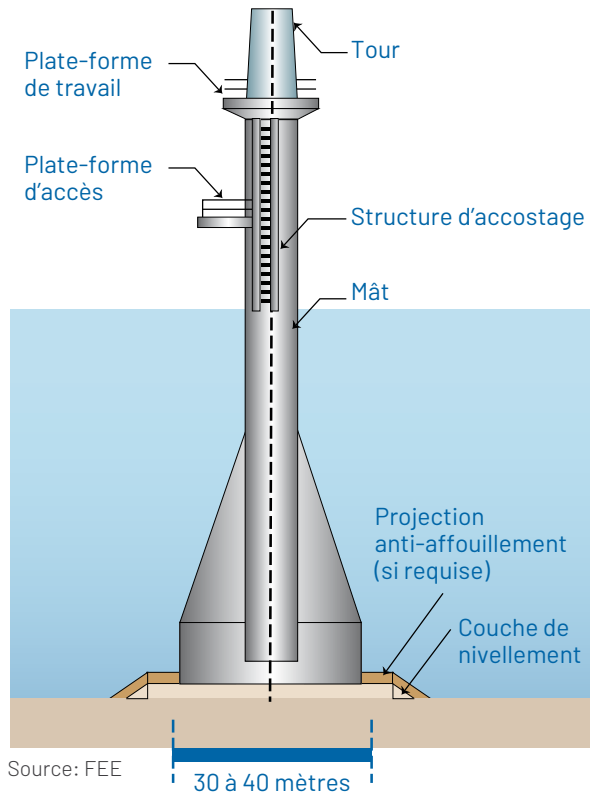
## Principe d'une fondation monopieu pour une éolienne de 12 GW



Source : FEE

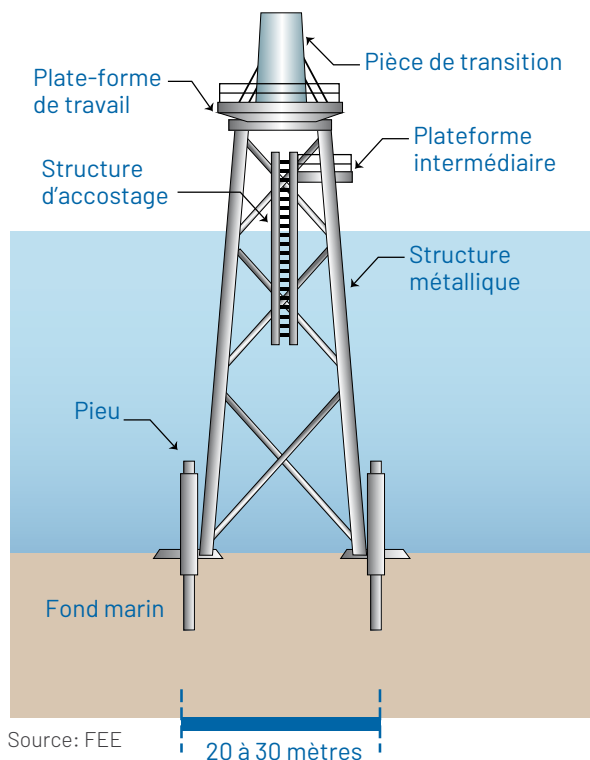
**Fondation monopieu** : constitué d'un pieu métallique enfoncé dans le fond marin par battage à l'aide d'un marteau hydraulique et/ou par forage, le diamètre du pieu est de l'ordre de 8 m pour une éolienne de 8 MW. Ce type de fondation est adapté aux terrains sédimentaires (sables et argiles) et répandu en mer du Nord. Les parcs éoliens en mer de Courseulles-sur-Mer et Saint-Nazaire vont disposer de fondations monopieu.

### Principe d'une fondation gravitaire pour une éolienne de 12 GW



**Fondation gravitaire** : constituée d'une large structure en béton ou en acier, la fondation gravitaire est posée sur le fond marin afin d'assurer la stabilité de l'éolienne. Son diamètre au sol est de l'ordre 30 à 40 m et sa masse de 2500 t pour une éolienne de 8 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 d'une fondation jacket pour une éolienne de 12 GW



**Fondation métallique ou jacket** : 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 3 m pour une éolienne de 8 MW. Les parcs éoliens en mer de Dieppe Le Tréport, Saint-Brieuc, Yeu Noirmoutier, vont disposer de ce type de fondation.

## Pourquoi un parc éolien en mer posé de grande puissance ?

Alors que les parcs en cours de développement sont chacun d'une puissance de l'ordre de 500 MW, le prochain parc éolien en mer posé installé au large de la Normandie sera d'une puissance d'1 GW. Les procédures de mise en concurrence pour des parcs de grande puissance deviennent en effet désormais 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. À titre d'exemple, le dernier parc éolien en mer attribué au Royaume-Uni est le parc de Dogger Bank, d'une puissance de 3,6 GW.

Cette évolution vers des parcs plus grands s'explique par plusieurs facteurs : 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.

1. Les technologies utilisées pour les parcs éoliens en mer sont devenues plus avancées 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.

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

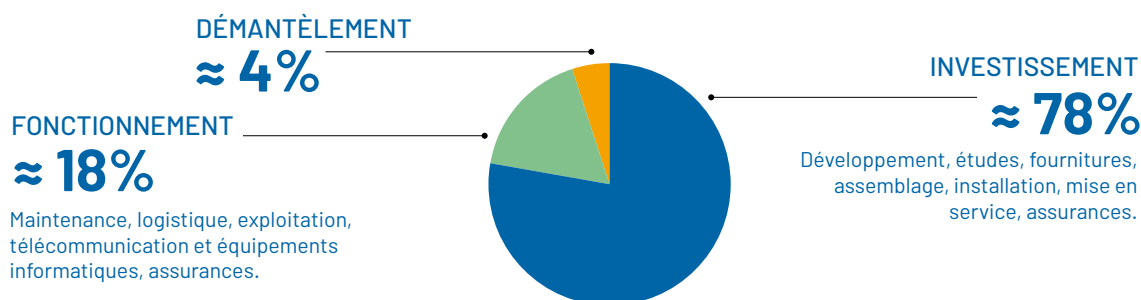
3. L'industrie de l'éolien nécessitant des investissements très importants avant de produire des revenus, elle est sensible aux effets d'échelle : le coût par éolienne installée est moindre pour un parc de 1 GW que pour un parc de 250 MW, ce qui diminue d'autant le besoin de soutien public. Il est ainsi plus intéressant économiquement de faire des parcs plus grands.

4. 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.

5. Il est préférable au plan environnemental de construire un parc de 1 GW plutôt que deux parcs de 500 MW par exemple, principalement du fait de la mutualisation des ouvrages de raccordement : 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, etc. D'un point de vue paysager, si un parc plus important peut être plus visible (phénomène de massification des éoliennes), 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 incite les acteurs publics et les industriels à lancer des projets plus importants que les projets initiaux.

### Coût d'un projet éolien



Source : MTES

## Quelles sont les principales étapes de la réalisation d'un parc éolien posé en mer ?

### La construction du parc éolien en mer



Fiche #15  
« Quelles sont les étapes d'un 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 ou pré assemblées dans des usines situées sur les ports, d'où elles partiront pour être installées en mer. Elles sont habituellement transportées vers leur lieu d'implantation sur un navire auto-élévateur ou une barge auto élévatrice, cette capacité d'auto élévation assurant 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 monopieu et jacket nécessitent l'installation de pieux (de diamètre nettement plus faible pour les jacket) 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 réalisé 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. Le nombre d'éoliennes chargées par voyage, donc le nombre de rotations du navire, dépend de la capacité du navire.

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 pâles). 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 pâles 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. 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 7000 tonnes

## Installation du parc de Dudgeon au Royaume Uni



Copyright : Siemens Gamesa Renewable Energy

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.

Un câble sous-marin inter-éoliennes est constitué de trois conducteurs en cuivre, 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. De la même manière que pour les câbles de raccordement de Rte, ces câbles sont prioritairement ensouillés dans le sol ; lorsque l'ensouillage est difficile, ils sont déposés au fond de la mer et protégés par des enrochements ou des matelas en béton.

### 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.

Elle est assurée 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 ou à partir d'un navire base lorsque le parc est très éloigné de la côte.

La liaison entre le port ou le navire base et les éoliennes se fait par des navires spécifiques (Crew Transfert Vessels) 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. 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.

