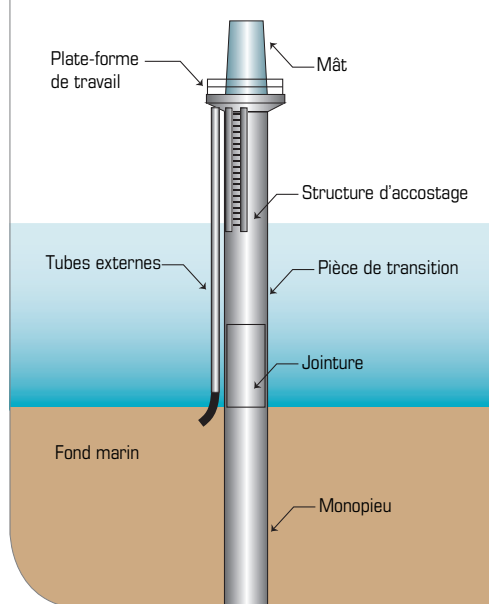


LES DIFFÉRENTS TYPES DE FONDATIONS EXISTANTS

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 ou ancrée sur le sol marin. Les fondations des éoliennes représentent entre 15 et 20 % de l'investissement total lié au parc éolien en mer.

LES TROIS PRINCIPAUX TYPES DE FONDATIONS ET LEURS CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

LA FONDATION MONOPIEU



Type : Monopieu

Matière : Acier

Installation : Battage, forage du fonds marin ou vibrofonçage

Fixation : Par jointure avec la pièce de transition, qui la relie au mât

Poids :

De 500 tonnes à plus de 1 000 tonnes

Profondeur des fonds adaptée :

Entre 0 et 30 mètres environ.

La profondeur moyenne des fonds marins dans les parcs européens est de 22,4 mètres (EWEA, 2014)

Exemple de parc l'utilisant :

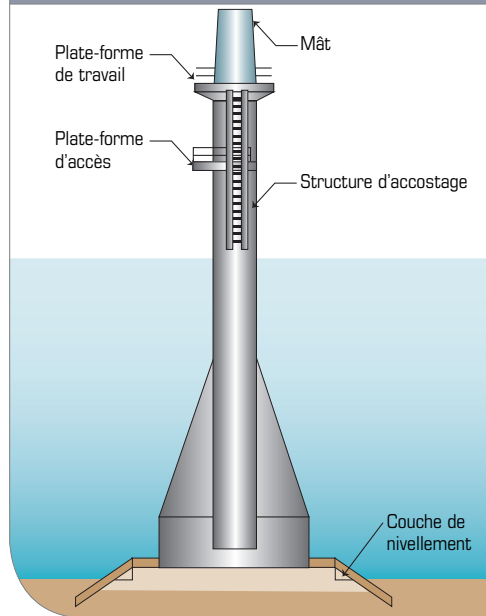
Horns Rev 2 (Danemark)

Tendance : Le monopieu est la solution la plus souvent sélectionnée pour les projets de parcs récents

(source : EIMYN)

LES DIFFÉRENTS TYPES DE FONDATIONS EXISTANTS

LA FONDATION GRAVITAIRE



Type : Base gravitaire

Matière : Acier et/ou béton

Installation : Descente par grue ou flottaison puis lestage sur site

Fixation : Pièce de transition dans laquelle est inséré le mât

Poids : À partir de 1 000 tonnes et jusqu'à 7 000 tonnes environ

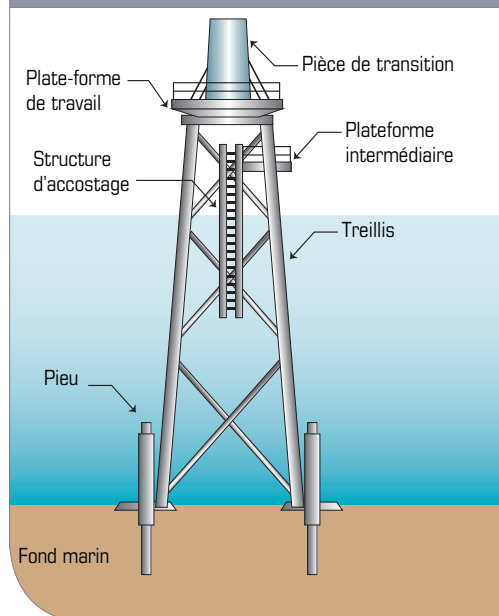
Profondeur des fonds adaptée : De 10 mètres jusqu'à 50 mètres

Exemple de parc l'utilisant : Thanet (Royaume-Uni)

Tendance : Peu de projets prévoient l'utilisation de fondations gravitaires

(source : EMIYN)

LA FONDATION EN STRUCTURES MÉTALLIQUES OU « JACKET »



Type : Tour-treillis sur 3 ou 4 pieds

Matière : Acier-tubulaire

Installation : Descente par grue puis ancrage des pieds par des pieux (soit pré-battus/pré-forés soit battus/forés après l'installation)

Fixation : Pièce de transition fixée en haut de la tour-treillis

Poids : De 300 tonnes à 1 000 tonnes environ

Profondeur des fonds adaptée : De 20 à 50 mètres

Exemple de parc l'utilisant : C-Power 2 (Belgique)

Tendance : Utilisation croissante notamment avec les turbines de grande puissance et les zones plus profondes

(source : EMIYN)

LES DIFFÉRENTS TYPES DE FONDATIONS EXISTANTS

AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DES TROIS TYPES DE FONDATIONS PRINCIPAUX

Avant de comparer les différents types de fondations, il est important de rappeler que les caractéristiques techniques, les coûts, la facilité d'installation, l'impact environnemental et la maintenance des fondations **dépendent fortement des conditions particulières de chaque site.**

AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DES TROIS TYPES DE FONDATIONS PRINCIPAUX

Type de fondation	Avantages	Inconvénients
Monopieu	<ul style="list-style-type: none"> • Technologie accessible et maîtrisée pour les éoliennes de petite et moyenne capacité. • Techniques de transport optimisées pour les monopieux traditionnels. • Moins cher que les autres fondations pour les éoliennes en dessous de 4MW et en eaux peu profondes. • Bénéficie de filières industrielles performantes en Europe pour sa conception et fabrication. • Perspectives de développement en eaux profondes des éoliennes de grande puissance (6 à 8 MW) intéressantes, adéquates pour les nouveaux types de monopieux appelés « monopieux XL »). • La surface de sol utilisée est minimale. 	<ul style="list-style-type: none"> • Technologie encore en développement pour s'adapter aux éoliennes de grande capacité (plus de 6 MW) et aux profondeurs importantes. • Fabrication, transport et installation plus complexes pour les plus gros calibres tels que les monopieux XL. • Coûts moins avantageux en eaux profondes (à partir de 20-25m). • La technique du battage, utilisée habituellement pour les installer, peut avoir des conséquences environnementales non négligeables (fonds marins et nuisances sonores). • Procédés industriels plus automatisés donc moins d'emplois sont mobilisés pour la construction. • Prix du marché de l'acier assez fluctuant.
Gravitaire	<ul style="list-style-type: none"> • Très bonne résistance aux mauvaises conditions météorologiques une fois la structure installée. • Le béton (matériau principal utilisé) est peu cher et son prix est peu fluctuant. • Pas de forage ou de battage nécessaire (moins de bruit). • Les matériaux qui composent la base gravitaire résistent mieux à l'environnement marin et nécessitent moins de maintenance. • Solution favorisant l'effet récif artificiel. • Une filière française se structure pour la production de fondations gravitaires sur le 1^{er} appel d'offres (Fécamp). 	<ul style="list-style-type: none"> • Moins adaptée aux fonds rocheux accidentés car les roches fragilisent la stabilité de la base. • Nécessite une préparation du sol sur une grande surface en amont de l'installation. • Peu de retour d'expérience européen car très peu de parcs en eau profonde les utilisent. • Peu d'installations portuaires propices à cette technologie, notamment en raison du poids très important qui nécessite des quais avec une résistance suffisante. • Le coût total production-transport-installation peut s'avérer moins compétitif que les autres types de fondations.
Structure métallique ou « Jacket »	<ul style="list-style-type: none"> • Le battage est moins intense que pour le monopieu car les pieux sont plus petits et donc l'impact acoustique sous-marin est moindre. Pour les sols plus durs, la technique du forage peut être mise en œuvre. • La structure treillis est favorable à l'effet récif artificiel. • Les espaces entre les tubes de la fondation permettent une meilleure résistance à la houle. • Cette technologie est largement utilisée et maîtrisée par le secteur pétrolier pour ses installations offshore en eaux profondes. • Avec ses 3 ou 4 points d'appui, le jacket permet une bonne stabilité des éoliennes. • Structure relativement légère. • Une filière française (Eiffage, STX) se structure pour la production de fondations jacket. 	<ul style="list-style-type: none"> • Une surface au sol relativement importante est mobilisée • La technique du battage, utilisée habituellement pour les installer, peut avoir des conséquences environnementales non négligeables (fonds marins et nuisances sonores). • Les coûts de maintenance sont potentiellement plus élevés que pour les autres types de fondation. • Les fondations jacket restent plus coûteuses que les monopieux en eaux peu profondes. • Les fondations jacket ne conviennent pas à certains fonds marins, notamment lorsque leur dénivellée est trop importante ou lorsque ces fonds sont trop irréguliers. • Retours d'expérience dans l'éolien offshore moins important que pour le monopieu. • Prix du marché de l'acier assez fluctuant.

LES DIFFÉRENTS TYPES DE FONDATIONS EXISTANTS

LES AUTRES TYPES DE FONDATIONS

D'autres types de fondations existent mais sont moins utilisés par les différents maîtres d'ouvrage européens souvent pour des raisons de coût ou de retour d'expérience.

Les fondations « tripode » sont formées d'une structure en acier sur trois pieds ancrés dans le fond marin. Elles sont aujourd'hui utilisées exclusivement dans certains parcs en Allemagne, mais seront probablement amenées à disparaître car jugées trop lourdes.

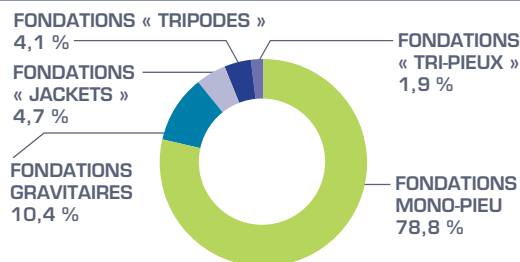
Les fondations « tri-pieu » ont été conçues et installées par l'opérateur BARD dans quelques parcs européens. Leur structure est formée de trois pieux relativement larges, ancrés dans le fond marin par battage, et fixés ensemble par une pièce de transition dont les trois branches se rejoignent au-dessus du niveau de la mer. Cependant l'entreprise BARD se retire du marché de l'éolien en mer et cette solution est donc potentiellement amenée à disparaître.

Les fondations utilisant la technologie « **suction buckets** » ou encore « **suction caissons** » fonctionnent selon un type d'ancrage différent : elles utilisent l'effet ventouse. La fixation au fond marin se fait en effet par descente lente dans la mer puis aspiration du fond, ce qui permet à la structure d'être solidement ancrée. Cette technologie est d'ailleurs compatible avec les autres types de fondations, mais elle n'est aujourd'hui pas encore totalement maîtrisée.

Enfin, l'éolien dit « **flottant** » fait l'objet de plusieurs recherches et des prototypes sont en cours d'étude par plusieurs acteurs du secteur : l'éolienne serait fixée à une base flottante rattachée au fond marin par des câbles. Son utilisation commerciale n'est cependant pas envisageable avant 2020. D'autre part, **la base flottante n'est pas envisagée** pour les parcs de Dieppe - Le Tréport et des îles d'Yeu et de Noirmoutier dans la mesure où l'appel d'offres porte uniquement sur des installations d'éoliennes en mer posées.

LA DISTRIBUTION DES DIFFÉRENTS TYPES DE FONDATIONS EN 2014

D'après les derniers chiffres fournis par la European Wind Energy Association (EWEA), la proportion de chaque type de fondation est répartie de la manière suivante :



(source : EWEA)

LA SOLUTION DE BASE POUR LE PROJET : LA STRUCTURE MÉTALLIQUE OU « JACKET »

Au cours de la phase d'appel d'offres, le maître d'ouvrage a évalué les différents types de fondations en regard des critères suivants :

- Adaptation avec les profondeurs d'eau ;
- Conformité avec la taille des turbines ;
- Conformité avec les propriétés géotechniques du sous-sol marin et les données météocéaniques ;
- Maturité des modalités de fabrication,

d'installation et de démantèlement ;

- Enjeux d'approvisionnement ;
- Respect des enjeux environnementaux ;
- Compatibilité avec les activités existantes ;
- Degré de complexité de la maintenance.

En considérant les données disponibles durant la phase d'appel d'offres, les

fondations en structures métalliques ont été retenues car elles répondaient le mieux aux critères de sélection énoncés ci-dessus.

Conformément au cahier des charges de l'appel d'offres, le maître d'ouvrage mène les études nécessaires pendant la phase de levée des risques, pour confirmer ses choix techniques, notamment ceux relatifs aux fondations.