

## Note sur les fermes éoliennes flottantes de taille commerciale

*Objectif de la note: décrire la vision de la filière sur les caractéristiques des futures fermes éoliennes flottantes de taille commerciale*

### Table des matières

<b>1</b>	<b>PRÉAMBULE.....</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>DESCRIPTION DES PRINCIPAUX ELEMENTS TECHNIQUES DES FERMES COMMERCIALES.....</b>	<b>3</b>
2.1	Les éoliennes.....	4
2.1.1	Evolution de la puissance et de la taille des éoliennes.....	5
2.2	Les flotteurs.....	7
2.3	Les ancrages.....	8
2.3.1	Les lignes de mouillage.....	9
2.3.2	Les ancres.....	9
2.4	Les câbles inter-éoliennes.....	10
<b>3</b>	<b>EMPRISE D'UNE FERME COMMERCIALE TYPE.....</b>	<b>12</b>

## 1 PRÉAMBULE

L'éolien flottant représente une technologie prometteuse qui n'a pas encore été déployée à l'échelle commerciale (plusieurs dizaines d'éoliennes flottantes) mais qui a fait l'objet de nombreuses expérimentations et démonstrateurs depuis 2009 et dont le dernier projet symbolique - la ferme pré-commerciale Hywind portée par Statoil – a été installée avec succès au large de l'Ecosse fin 2017.

Le marché de l'éolien flottant est mondial et nombreuses sont les études produites ces dernières années démontrant l'intérêt de cette technologie qui permet de s'installer dans des zones jusque là inexploitées par l'éolien offshore posé.

Par ailleurs, la nature « flottante » de cette technologie devrait permettre :

- De réduire les impacts environnementaux des projets lors des phases d'installation étant donné que les éoliennes flottantes sont assemblées en zone portuaire et non plus en mer ;
- De s'éloigner des zones où les usages sont plus importants (notamment pêche cotière, servitudes militaires, activités de loisirs, plaisance, etc.) ;
- De réduire les coûts d'installation en mer (et donc du coût de l'énergie produite) pour la même raison que le point précédent. En effet, les navires spécifiques coûteux utilisés pour l'installation des éoliennes posées en mer seront remplacés par des navires standards pour la pose des lignes d'ancrage et le remorquage des éoliennes flottantes sur site.

Le Carbon Trust<sup>1</sup> a notamment produit en 2015 un rapport qui dresse un état des lieux complet de l'éolien flottant en termes de technologies et de marché (« *Floating Offshore Wind: Market and Technology Review* », juin 2015 <sup>2</sup>). Ce rapport a permis d'établir certaines pistes de développements pour passer des démonstrateurs/fermes pré-commerciales au stade des fermes commerciales.

Dans la suite de ce rapport, le Carbon Trust supervise en ce moment un JIP (Joint Industry Project) dédié à l'éolien flottant, dans lequel certains industriels français sont parties prenantes. Un premier rapport issu d'études menées par des prestataires spécialisés sur trois briques technologiques indispensables au déploiement de l'éolien flottant commercial a été publié<sup>3</sup>:

- Le système électrique (traitant notamment câbles dynamiques et des sous-stations flottantes) ;
- Le système d'ancrage ;
- Les infrastructures portuaires et la chaîne logistique en phases de construction et de maintenance.

Ce JIP permet ainsi d'établir en détail l'état de l'art pour ces trois briques et liste les éventuels optimisations ou challenges à relever pour développer des projets commerciaux.

Il fournit ainsi une base de données intéressante permettant de préfigurer les équipements techniques qui constitueront les futures fermes commerciales.

---

1 <https://www.carbontrust.com/home/>

2 <https://www.carbontrust.com/media/670664/floating-offshore-wind-market-technology-review.pdf>

3 <https://www.carbontrust.com/media/675868/flw-jip-summaryreport-phase1.pdf>

## 2 DESCRIPTION DES PRINCIPAUX ELEMENTS TECHNIQUES DES FERMES COMMERCIALES

Une ferme commerciale consiste à un ensemble d'éoliennes flottantes maintenues en place par des systèmes d'ancrage et reliées entre elles par des câbles électriques inter-éoliennes.

Les fermes commerciales sont reliées au réseau public de transport au niveau d'une sous-station électrique en mer ou à terre.

Dans le cas d'une sous-station en mer, l'énergie produite par la ferme est donc évacuée à partir de celle-ci jusqu'au réseau RTE à terre à travers une liaison de raccordement sous-marine puis souterraine (constituée d'un ensemble de 1 à 2 câbles de 225 kV selon la puissance installée de la ferme). Cette sous-station pourrait être flottante selon les profondeurs.

En cas d'évacuation directe, plusieurs câbles de raccordement sont nécessaires (typiquement un câble de 66kV permet d'évacuer +/- 70MW mais on économise le coût significatif d'une sous-station électrique en mer).

**Le tableau suivant résume les caractéristiques technique d'une ferme commerciale type à horizon des appels d'offres qui pourraient être lancés par l'Etat à partir de 2019 donc avec une mise en service espérée du projet vers 2026. Les puissances indiquées sont purement indicatives, la taille des projets qui seraient mis en oeuvre pouvant être influencée par de nombreux facteurs spécifiques (objectifs de coûts, degré de maturité des technologies envisagées, enjeux portuaires, conditions de raccordement, enjeux environnementaux..etc).**

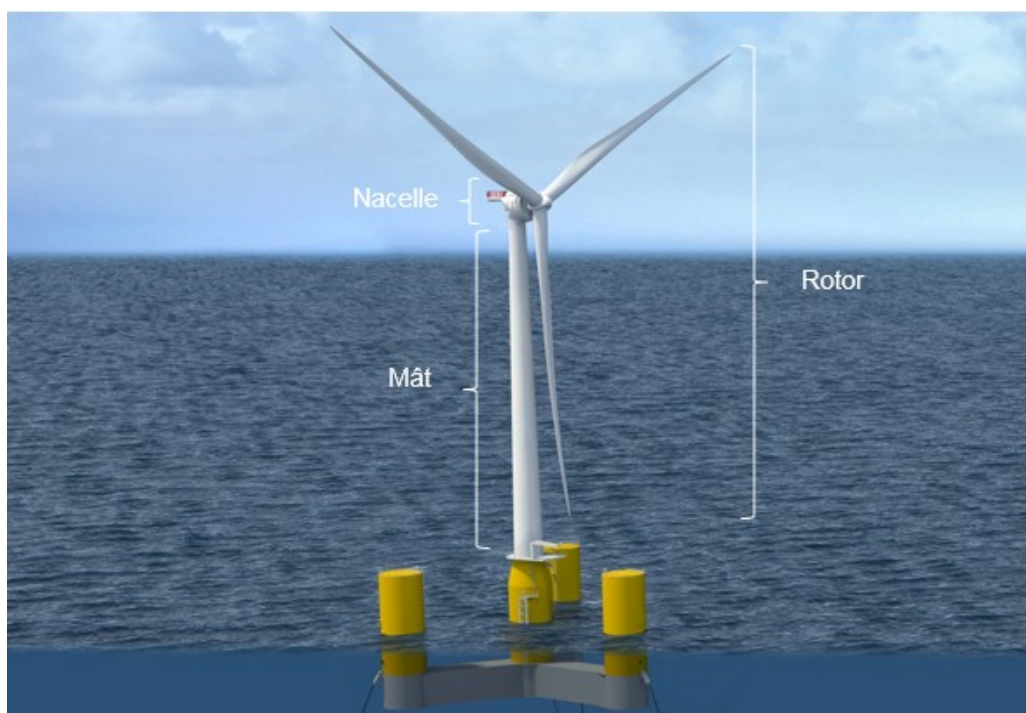
**Tableau 1: Caractéristiques types (enveloppe min-max indicatives) d'un projet commercial installé en Méditerranée à l'horizon 2026**

Paramètres	Valeur min	Valeur max
Puissance installée du parc ( <i>enveloppe fixée par l'Etat lors de l'Appel d'offres</i> )	250 MW	500 MW
Puissance unitaire de l'éolienne	10 MW	15 MW
Nombre d'éoliennes flottantes	17 (avec des 15 MW)	50 (avec des 10 MW)
Espacement entre les éoliennes flottantes	4 fois le diamètre de rotor	8 fois le diamètre de rotor
Hauteur du moyeu des éoliennes	110 m	130 m
Diamètre du rotor	160 m	220 m
Hauteur maximum de l'éolienne (pale à la verticale vers le haut)	185 m	250 m

Paramètres	Valeur min	Valeur max
Hauteur du bas de pale (pale à la verticale vers le bas)	22 m	/
Type de flotteur	Semi-submersible (dont barge), TLP, Spar (sous réserve de fonds supérieurs à 100m)	
Type d'ancrage	Caténaire, semi-tendu, tendu	
Type d'ancre	Ancre à enfouissement, pile à succion, gravitaire, ancres hybrides	
Nombre de lignes d'ancrage + ancres par flotteur	3	8
Techniques de protection des câbles inter-éoliennes	Pose libre ou protection par ensouillage ou par protection externe (coquille, matelas béton, enrochement)	
Tension des câbles inter-éoliennes	66 kV	/

## 2.1 Les éoliennes

Les éoliennes actuellement disponibles sur le marché et déjà installées sur les parcs éoliens en mer commerciaux sont des éoliennes à trois pales orientées face au vent et tournant autour d'un axe horizontal. Le cas d'éoliennes de nouvelle génération, actuellement en phase de R&D, n'est volontairement pas abordé.



**Figure 1: Illustration de l'Haliade™ 150 sur le flotteur Naval Energies (source : GE/Naval Energies)**

Elles sont composées des 3 grands éléments suivants :

- **Le mât** : conique, en acier ou en béton, divisé en 3 tronçons. Son diamètre est d'environ 7 mètres à la base et 4 mètres au sommet. Le mât contient des structures secondaires internes (plateformes, échelles, monte-charge), des équipements électriques et électroniques (câbles, transformateur, cellules, convertisseur, etc.) et des éléments de sécurité (éclairage, extincteurs).
- **La nacelle** : Elle contient des éléments structurels (châssis, couplage du rotor, roulements), des composants électromécaniques (génératrice, boîte de vitesse<sup>4</sup>, système d'orientation au vent, système d'ajustement des pales) et des éléments de sécurité (éclairage, extincteurs, freins) ;
- **Le rotor** : il est constitué de 3 pales fixées sur le moyeu. Les pales sont faites en matériaux composites incluant des fibres de verre et du carbone, leur conférant une résistance maximale.

Les éoliennes commencent à tourner (et donc à produire de l'énergie) à partir d'environ 3 m/s de vent, soit 11 km/h (la vitesse de rotation des pales étant alors de l'ordre de 4 tours par minute), et s'arrêtent automatiquement lorsque la vitesse du vent dépasse les 25 m/s soit 90 km/h environ (la vitesse de rotation des pales est alors de l'ordre de 10 à 12 tours par minute selon la technologie).

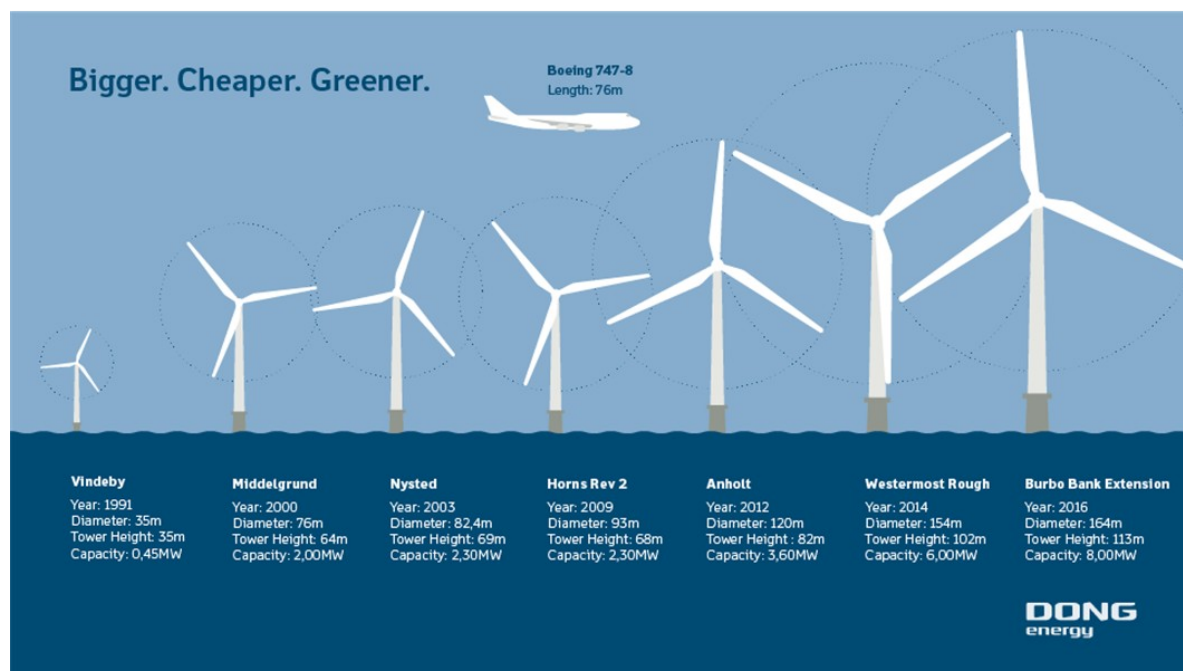
Les éoliennes sont balisées et peintes selon la réglementation en vigueur (notamment la recommandation AISM 0-139 de décembre 2008 sur la signalisation des structures artificielles en mer, et l'arrêté du 23 avril 2018 relatif à la réalisation du balisage des obstacles à la navigation aérienne).

### 2.1.1 Evolution de la puissance et de la taille des éoliennes

La puissance nominale des éoliennes est fonction de la surface balayée par les pales. Ainsi, plus les pales (et donc l'éolienne) sont grandes, plus l'éolienne sera puissante.

<sup>4</sup> Pour les éoliennes qui ne sont pas à entraînement direct

Au fil du développement de l'éolien en mer, afin d'augmenter la puissance des parcs tout en réduisant le nombre d'éoliennes et le coût de l'énergie produite, la puissance et donc la taille des éoliennes n'ont cessé d'augmenter comme l'illustre la figure ci-dessous.



**Figure 2: Illustration de l'augmentation constante de la puissance et taille des éoliennes en mer (source: Dong energy)**

C'est pourquoi, les industriels prévoient une poursuite de cette augmentation de taille et de puissance et estiment que des modèles de l'ordre de 10 MW à 15 MW seront disponibles au moment de l'installation des prochaines fermes commerciales flottantes en Méditerranée (horizon 2026).

Aujourd'hui, les modèles les plus puissants actuellement disponibles sur le marché de l'offshore sont de 8 MW (Siemens Gamesa), et 9,5 MW (MHI Vestas).

L'ensemble des industriels du secteur des éoliennes développent actuellement des turbines avec une puissance supérieure ou égale à 10MW, à l'image de GE qui a récemment annoncé le développement d'une turbine de 12 MW dont le prototype en mer serait prévu pour 2021, ou de Senvion qui travaille sur une 10+MW.

## 2.2 Les flotteurs

L'éolien flottant permet de s'affranchir de la contrainte de profondeur d'eau pour aller chercher des zones jusque là inexploitées par l'éolien posé et plus ventées.



**Figure 3 : Illustration de l'éolien posé et l'éolien flottant (source: Josh Bauer, National Renewable Energy Laboratory - NREL)**

Différents types de flotteurs sont développés à travers le monde pour le marché de l'éolien flottant et peuvent se classer en 3 grandes familles :

- **Les flotteurs semi-submersibles** (*technologie prévue sur les fermes pilotes Eolmed, Eoliennes flottantes du Golfe du Lion et Eoliennes flottantes de Groix&Belle-Ile*): plateforme flottante semi-immersée ancrée au fond marin par un ancrage caténaire ou semi-tendu. La stabilité de la structure est apportée par les dimensions et éventuellement le poids importants de l'ensemble, mais c'est une structure au tirant d'eau limité qui permet une installation plus flexible et plus simple. *Exemples : Naval Energies, Windfloat (Principle Power), Trifloater (Gusto MSC), barge (Ideol) ;*
- **Les flotteurs « Spar »** : structure de forme cylindrique ballastée au fond pour apporter la stabilité, et associée à un ancrage caténaire. Le tirant d'eau important (plus de 100m) et la technique d'installation limite fortement les géographies propices à ce type de flotteur (Norvège, Ecosse). *Exemples : Hywind (Statoil), Sway ;*
- **Les flotteurs « TLP (Tension Leg Platform) <sup>5</sup> »** (*technologie prévue sur la ferme pilote de Provence Grand Large*): flotteur quasiment entièrement immergé, ancré au fond marin à l'aide de lignes tendues qui assurent une très bonne stabilité de la structure limitant les mouvements à la nacelle. Cette technologie intègre des principes permettant d'éviter et réduire l'impact sur l'environnement et les usages (surface des projets réduite, emprise limitée sur les habitats marins) *Exemples : IFPEN SBM Offshore, Pelastar (Glosten), GICON.*

---

<sup>5</sup> Plateforme à ancrage tendu

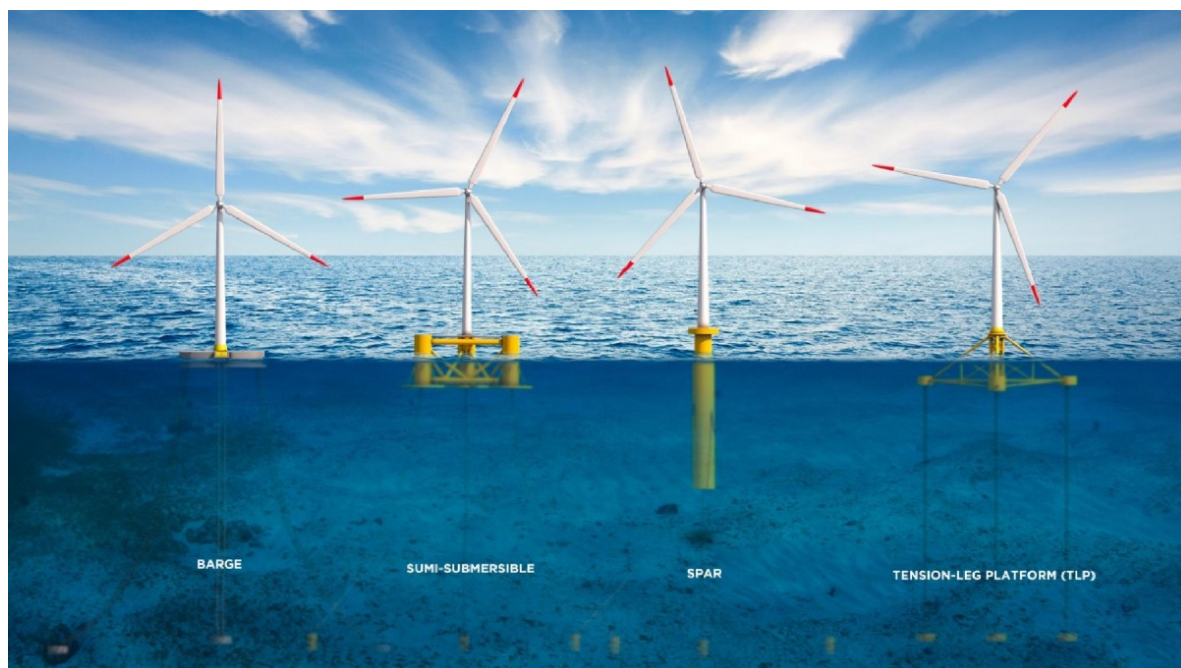


Figure 4: Technologies de flotteurs (source : WindEurope)

### 2.3 Les ancrages

Les systèmes d'ancrages regroupent l'ensemble des équipements nécessaires au maintien des éoliennes flottantes sur leur position. Ces ancres s'inspirent des équipements déjà largement utilisés dans l'offshore pétrolier.

Les éléments principaux sont :

- Les lignes de mouillage ;
- Les ancres.

D'autres éléments annexes peuvent être cités : les bouées de flottaison subsurfaces, les connecteurs, les tensionneurs, les poids de lestage, etc.

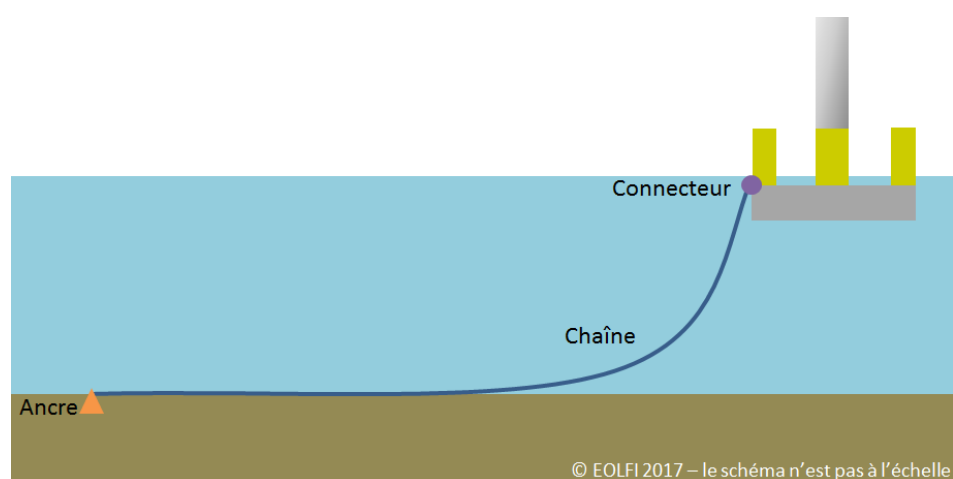


Figure 5: Schéma de composition d'une ligne de mouillage type caténaire (source : EOLFI, 2017)



### 2.3.1 Les lignes de mouillage

Les lignes peuvent être caténares, tendues ou semi-tendues et dépendent de la technologie du flotteur (par exemple, un flotteur TLP n'utilisera que des lignes tendues).

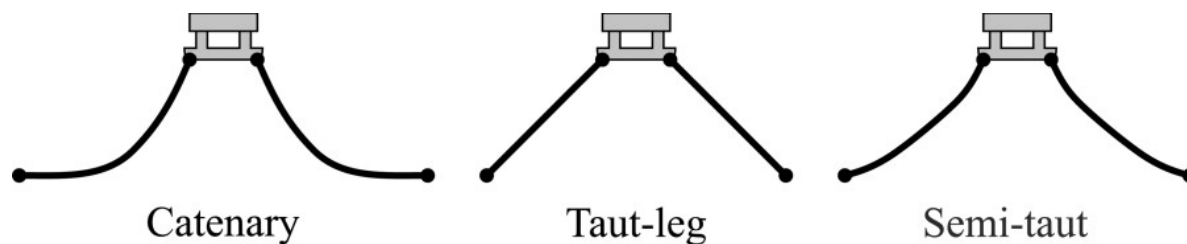


Figure 6: Illustration des types d'ancrages possibles (source: ASME)

Différents matériaux sont possibles pour les lignes:

- chaînes en maillons acier ;
- fibres synthétiques (polyester, nylon) ;
- câbles en acier ;
- un mix des éléments ci-dessus.



Figure 7: Illustration d'une chaîne en maillons acier (source : The Maritime Executive)

### 2.3.2 Les ancres

De la même manière, il existe différents types d'ancres possibles pour l'éolien flottant :

- Ancre à enfouissement ;
- Pile à suction<sup>6</sup> ;
- Ancre gravitaire ;

Solutions hybrides.

<sup>6</sup> Une pile à suction se présente sous forme d'un cylindre métallique ouvert au fond et fermé sur le dessus installé dans le fond marin grâce à un système de pompe qui crée une sous-pression. C'est une technique éprouvée dans l'offshore pétrolier dont la mise en œuvre est très simple mais nécessite des sols adéquats.



**Figure 8: Illustration de l'ancre à enfouissement (source: Vryhof)**

Les profondeurs d'enfouissement des ancres dépendant des conditions de sol rencontrées. Dans le golfe du Lion, on peut estimer des profondeurs de l'ordre de 10 à 15 m dans le sédiment de surface.



**Figure 9: Illustration de piles à succion**

## **2.4 Les câbles inter-éoliennes**

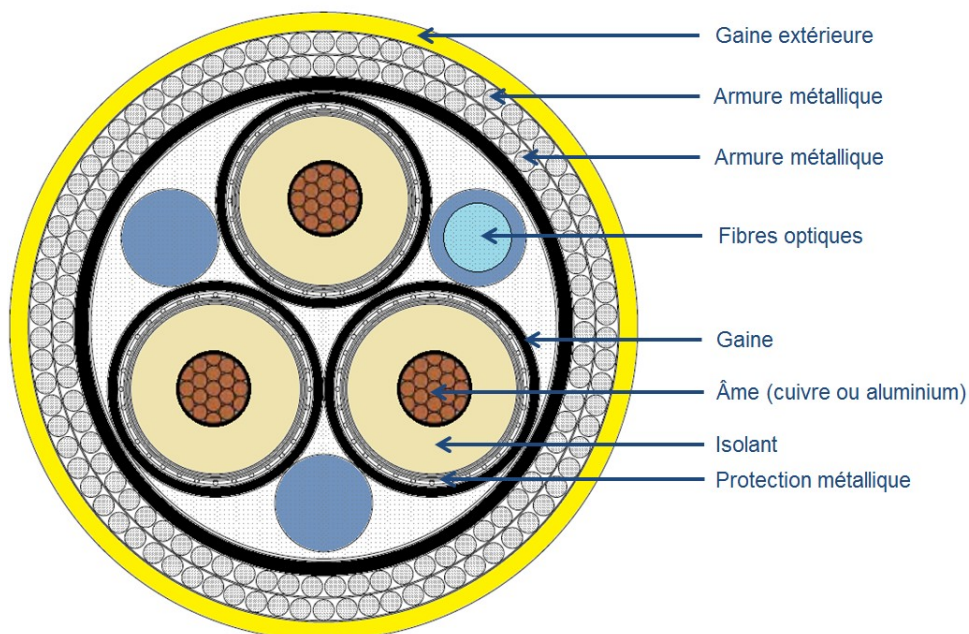
Le réseau électrique inter-éoliennes d'une ferme commerciale consiste à faire transiter l'énergie produite d'une éolienne à l'autre à travers des câbles électriques sous-marins dans lesquels circule un courant alternatif triphasé et dont la tension sera de l'ordre de 66 kV.

Ces câbles contiennent également les fibres optiques nécessaires à la transmission des informations (données de production, alertes de dysfonctionnement, etc.).

Une double armure métallique intégrée au câble le protège des différents chocs et abrasions pouvant être rencontrés sur les fonds marins. Cette double protection permet également aux câbles de garder leur intégrité et leur fonctionnement malgré les

mouvements des flotteurs : ce sont des câbles dits « dynamiques » (également appelés « ombilicaux »)<sup>7</sup>.

Le diamètre extérieur des câbles inter-éoliennes est de l'ordre de 15 à 20 cm.



**Figure 10: Schéma en coupe d'un câble triphasé dynamique inter-éoliennes (source: EOLFI)**

<sup>7</sup> Les câbles dits « statiques » ne possèdent quant à eux qu'une seule armure métallique de protection et ne peuvent ainsi pas supporter les mouvements engendrés par le flotteur.

### 3 EMPRISE D'UNE FERME COMMERCIALE TYPE

Les fermes commerciales d'éoliennes flottantes seront « visuellement » similaires aux fermes commerciales d'éoliennes offshore posées, qui consistent en plusieurs alignements d'éoliennes disposées selon les contraintes du site d'implantation, telles que :

- direction du vent, des courants et des vagues dominants ;
- bathymétrie ;
- enjeux d'usages, d'environnement ou de paysage ;
- etc.

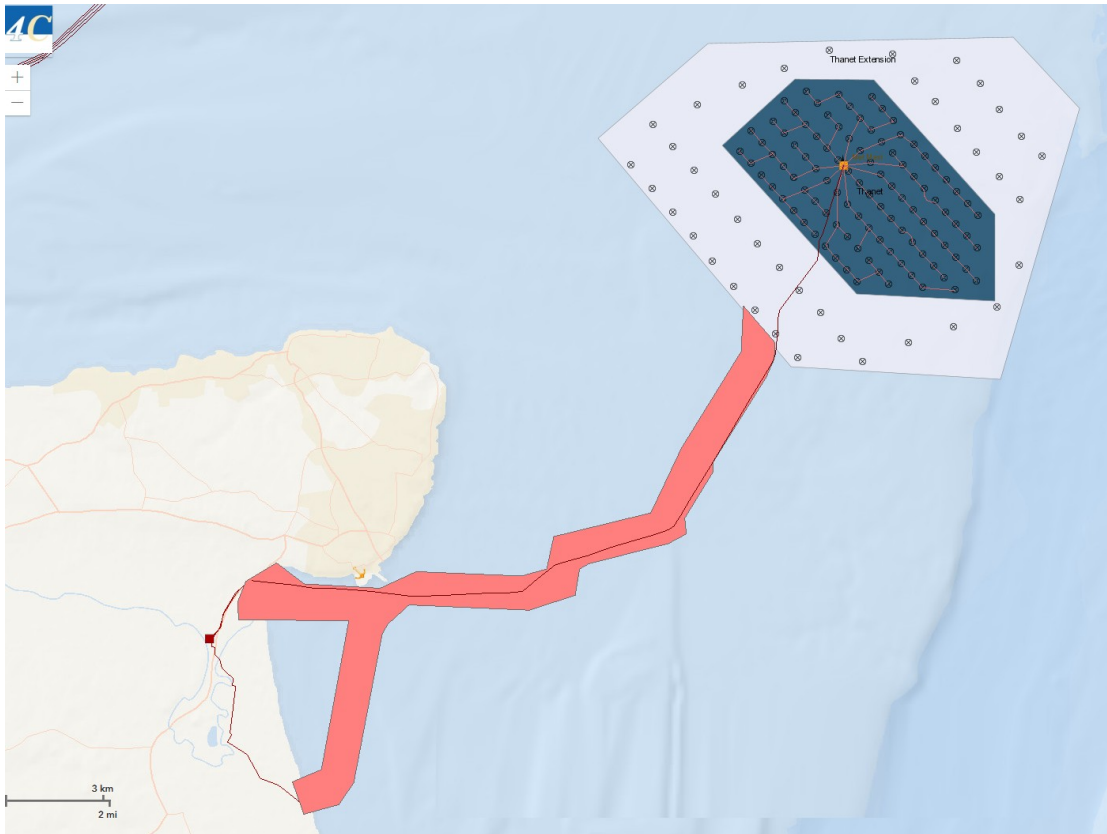


**Figure 11: Illustrations d'une ferme commerciale éolienne offshore sur fondations posées (sous-station électrique au premier plan)**

Le site internet 4C Offshore<sup>8</sup> permet de visualiser sur une cartographie mondiale les parcs offshore déjà installés ou en projet.

---

<sup>8</sup> <https://www.4c offshore.com/offshorewind/>



**Figure 12: Visualisation du parc éolien posé de Thanet (UK) et de son extension en projet (source: 4C Offshore)**

Pour l'éolien flottant, les emprises des projets dépendront en partie du type d'ancrage retenu et des puissances mis en œuvres :

Ainsi, l'emprise d'une ferme éolienne flottante type serait de l'ordre de :

- 60 à 100 km<sup>2</sup> pour une ferme type de 500 MW (50 éoliennes de 10 MW) ;
- 30 à 50 km<sup>2</sup> pour une ferme type de 250 MW (25 éoliennes de 10 MW).
- 18 à 30 km<sup>2</sup> pour une ferme de 150 MW (15 éoliennes de 10MW).

\* \* \*