

Nos amis de « l'Amicale de l'Offshore pétrolier » nous ont autorisé à insérer un article de leur revue « Le Pélican » sur « les éoliennes flottantes » rédigé par Jean PEPIN-LEHALLEUR suite à sa conférence. Nous les en remercions.



Académie de marine

Conférence « les éoliennes flottantes » par Jean PEPIN-LEHALLEUR, 28 Mars 2018.

Introduction

Je me propose de vous présenter aujourd'hui les éoliennes flottantes.

En effet, quatre fermes-pilotes d'éoliennes flottantes ont été décidées en France en 2016 pour des installations à partir de 2021. C'est donc un sujet d'actualité et la France tente de rattraper son retard par rapport aux autres pays européens dans ce domaine.

Les éoliennes offshore connaissent le développement le plus rapide parmi les EMR's (Energies Marines Renouvelables), les autres technologies (hydroliennes, houlomoteurs, ETM) ne dépassant pas à ce jour le stade de prototypes, certains ayant même expérimenté quelques revers. Les éoliennes offshore fixes sont déjà au stade des fermes commerciales en Europe et bientôt en France, mais les éoliennes flottantes arrivent maintenant au stade des fermes-pilotes, stade ultime avant les fermes commerciales.

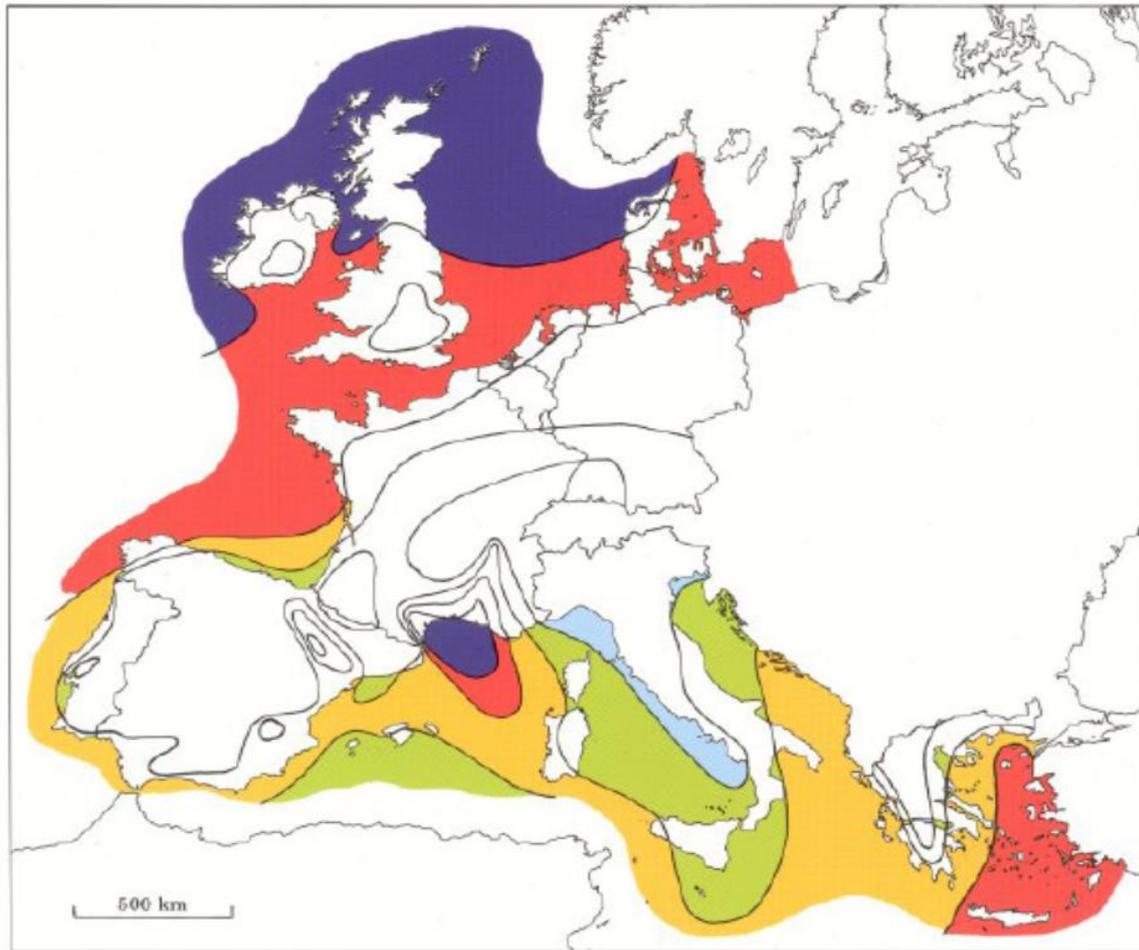
Ces éoliennes flottantes présentant des aspects particuliers, il m'a semblé intéressant de vous les présenter aujourd'hui.

1 - Les éoliennes en mer (ou éoliennes offshore).

Cette filière est largement plus développée que les précédentes et présente encore de nombreuses perspectives de développements commerciaux. C'est en effet la filière la plus mature techniquement et d'application la plus universelle car elle est moins onéreuse à mettre en œuvre et a des perspectives de développement plus étendues. Si l'on regarde la carte des vents au-dessus de la mer, on voit qu'il y a en Europe des zones très favorables : le nord de la mer du Nord et de la mer d'Irlande, et le golfe du Lion et des zones relativement favorables : le sud de la mer du Nord, la Manche, la Bretagne. Les projets d'éoliennes offshore fixes sont ou vont être implantés dans ces zones.

A fin 2017, l'Europe compte 16 GW d'éoliennes fixes en mer en service essentiellement au Royaume-Uni et en Allemagne, au Danemark, aux Pays-Bas et en Belgique mais aucune en France ! La France a attribué 3 GW lors des premiers appels d'offres lancés en 2011 et en 2013 pour des éoliennes fixes (installations initialement prévues vers 2021) et un nouveau parc de 250 à 750 MW au large de Dunkerque est au stade d'appel d'offres. Cependant des retards sont constatés à cause de difficultés administratives. En France,

la gestion des projets EMR s'est gérée par l'ADEME, qui assure le lancement des projets et leurs suivis pour le compte de l'Etat.



Wind resources over open sea (more than 10 km offshore) for five standard heights										
	10 m		25 m		50 m		100 m		200 m	
	ms ⁻¹	Wm ⁻²								
Dark Blue	> 8.0	> 600	> 8.5	> 700	> 9.0	> 800	> 10.0	> 1100	> 11.0	> 1500
Red	7.0-8.0	350-600	7.5-8.5	450-700	8.0-9.0	600-800	8.5-10.0	650-1100	9.5-11.0	900-1500
Yellow	6.0-7.0	250-300	6.5-7.5	300-450	7.0-8.0	400-600	7.5- 8.5	450- 650	8.0- 9.5	600- 900
Light Green	4.5-6.0	100-250	5.0-6.5	150-300	5.5-7.0	200-400	6.0- 7.5	250- 450	6.5- 8.0	300- 600
Light Blue	< 4.5	< 100	< 5.0	< 150	< 5.5	< 200	< 6.0	< 250	< 6.5	< 300

Source: Rapport Energies marines – Région Bretagne (2009)

Source: European Wind Atlas, 1989.

Le vent « offshore » en Europe

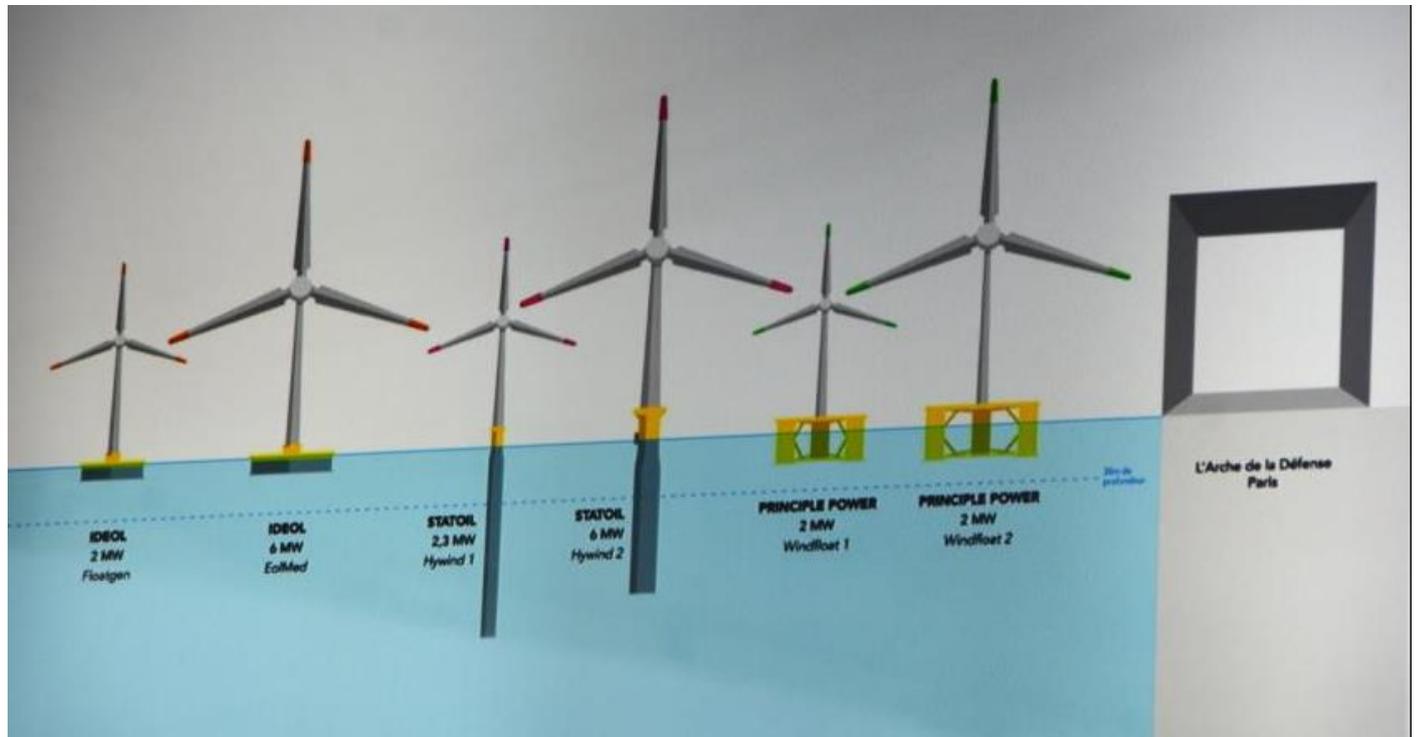
Pour la France, on voit qu'il est nécessaire d'aller maintenant plus au large, les emplacements acceptables étant maintenant pris ; pour le golfe du Lion, la profondeur augmente rapidement et il est plus économique de passer à des éoliennes flottantes par plus de 50m d'eau, si on veut être à plus de 15km de la cote pour éviter les critiques des riverains (le fameux syndrome « NIMBY » = Not in My Back Yard »).

Un effort particulier a été fait pour rattraper notre retard et plus récemment, c'est-à-dire fin 2016, la France a décidé de 4 fermes-pilotes d'éoliennes flottantes, objet de la présentation ci-après, en plus d'un nouveau champ d'éoliennes fixes.

Les éoliennes offshore, fixes ou flottantes sont caractérisées par leur puissance unitaire très importante : les fermes pilotes d'éoliennes flottantes actuelles sont basées sur des turbines de 6 à 8 MW, pour

optimiser les couts. Comme explicité plus loin, il y a une variété de flotteurs, ayant chacun leurs avantages et inconvénients ; néanmoins les turbines choisies pour ces projets-pilotes sont toutes du même type, c'est-à-dire des turbines tri pales à axe horizontal comme celles à terre. Les projets de turbines à axe vertical avec rotor du type Darrieus, objet de prototypes à terre, n'ont pas été retenus.

2 - LES EOLIENNES OFFSHORE FLOTTANTES



Divers types d'éoliennes flottantes

2-1. DEMONSTRATEURS

Il faut bien distinguer les projets « démonstrateurs » ou « prototypes » basés généralement sur une seule unité, parfois de taille un peu réduite, des projets « pilotes » qui sont en général des projets de plusieurs machines de taille définitive, avec production d'électricité, stade ultime avant les futures fermes « commerciales » constituées de nombreuses machines.

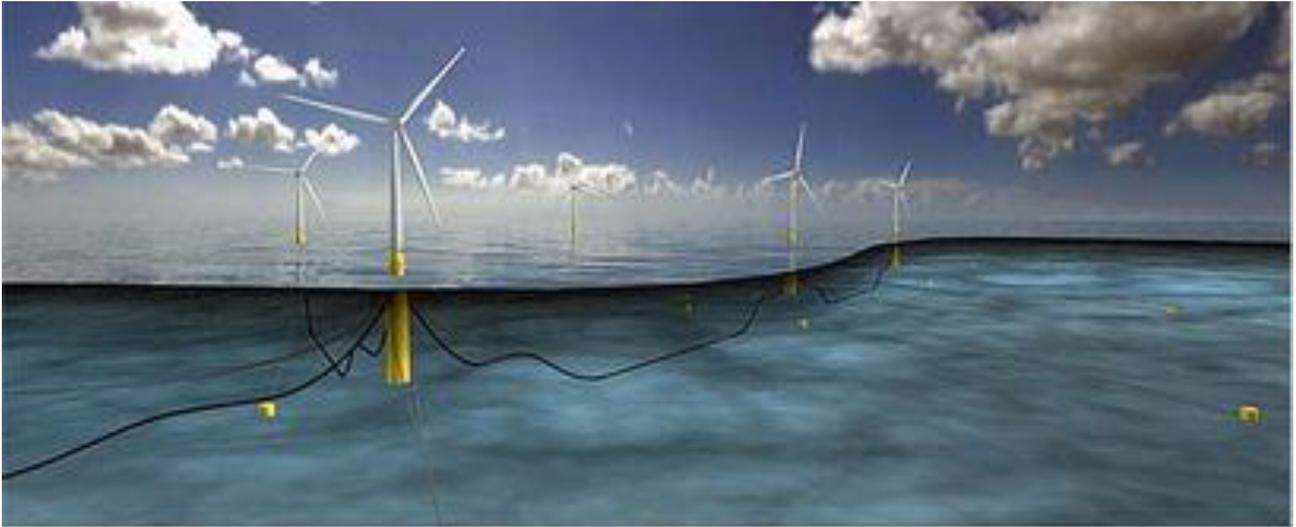
Après le succès de prototypes d'éoliennes flottantes, en Norvège (projet HYWIND avec un flotteur type «Spar» par Statoil) et au Portugal (projet WINDFLOAT avec un flotteur type « semi-submersible », de 2011 à 2016), la France doit installer un prototype sur le site de SEM-REV au large du Croisic début 2018. Ces projets « démonstrateurs » ou prototypes sont des machines de taille réduite (les prototypes mentionnés étaient équipés de turbines de 2 MW) et il n'y a pas d'objectif de production électrique continue. D'autres projets prototypes sont en cours au Japon, Taïwan, Corée, Etats-Unis.

2-2. LES FERMES-PILOTES

Ce terme de « Ferme-Pilote » couvre des projets de quelques machines de taille « commerciale », dernière étape avant les fermes « commerciales » avec une grande quantité de machines (typiquement 50 à 100 machines) ; la production électrique est injectée dans le réseau national.

2.2.1- Projet HYWIND. La première ferme « pilote » au monde se trouve à 25 Km de Peterhead, au large de l'Ecosse, dans 100m d'eau, produisant depuis septembre 2017 avec des 5 turbines de 6 MW montées

sur des flotteurs du type « Spar », basés sur le prototype de 2,3 MW testé en Norvège en 2009 On voit ici l'intérêt d'avoir un prototype avant de se lancer dans une ferme pilote. Le concept de flotteurs du type « Spar » n'a pas été proposé pour les projets de fermes-pilotes en France, car les profondeurs ne sont pas suffisantes. Ce concept a été retenu pour le projet HYWIND par STATOIL au large de l'Ecosse : 5 unités devant produire 134 GWH /an, à 25 km de Peterhead, dans 95 à 120 m d'eau, à partir de 2017 ;



Projet pilote HYWIND (Ecosse). Flotteur SPAR

le flotteur a un tirant d'eau de 80m ; sa structure pèse 2500 tonnes et contient plus de 5000 tonnes de ballast solide (minerai de fer). L'ancrage est classique avec des chaînes et des ancres à succion. Le principal avantage de ce concept réside dans une très bonne réponse à la houle (très faibles mouvements, peu de pilonnement) mais l'inclinaison due au vent ne peut être compensée. La structure est simple mais lourde et elle ne permet pas l'assemblage du rotor et de la nacelle le long d'un quai ; Les machines et leurs mâts ont été assemblés au flotteur « Spar » par une très grosse grue flottante dans un fjord en Norvège avant d'être remorquées sur place.

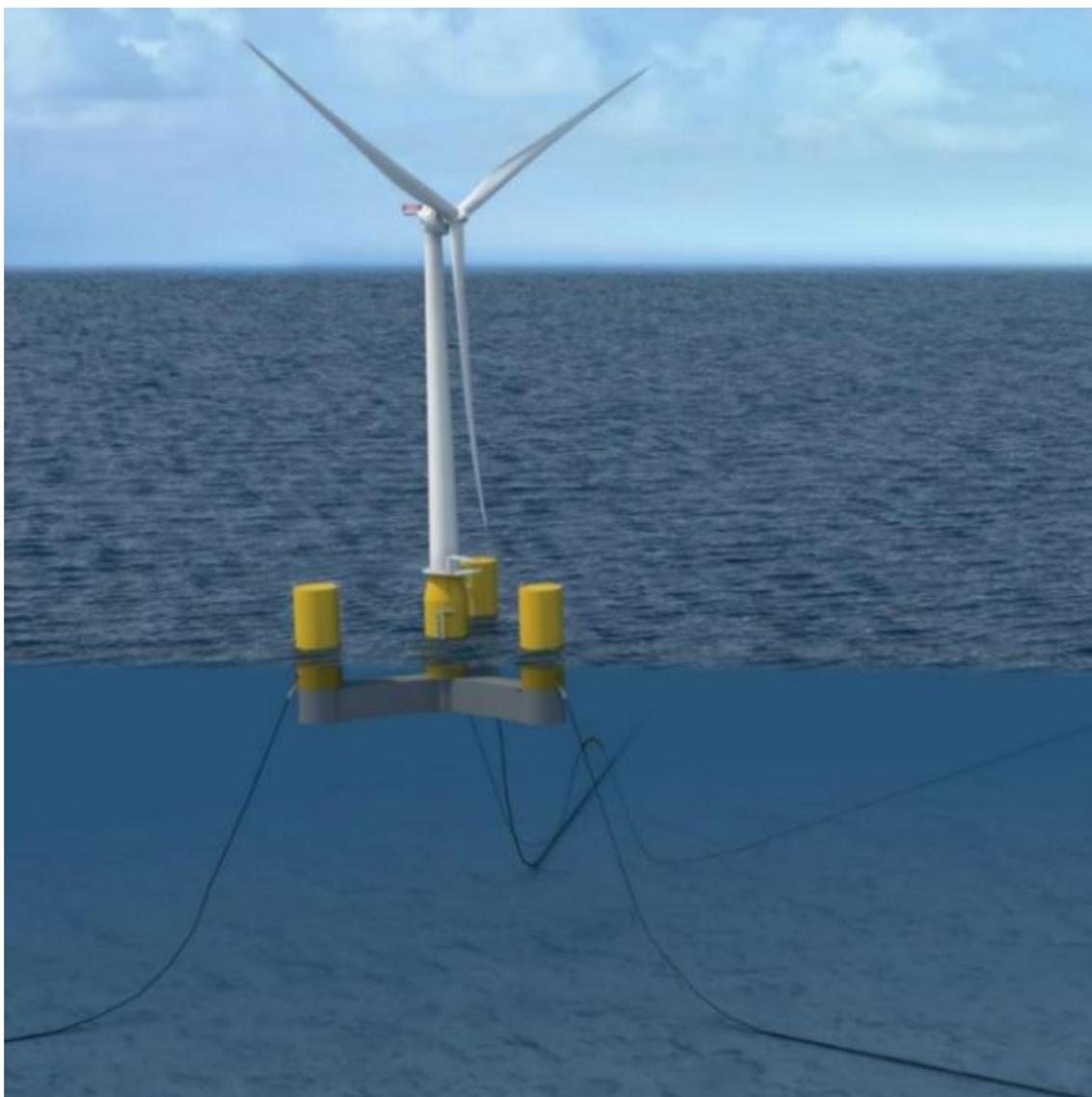
En France, quatre projets-pilotes d'éoliennes flottantes ont été lancés fin 2016, un en Atlantique, trois dans le Golfe du Lion prévues pour une mise en service vers 2022 :



Projet EOLMED (Gruissan) – Flotteur type radeau en béton

2.2.2- Projet EOLMED à GRUISSAN : 4 machines SENVION de 6 MW, porté par le groupe QUADRAN (Energicien indépendant), à 15 km de la côte, avec flotteur toroïdal à section carrée, en béton, extrapolé du prototype en béton avec une turbine de 2 MW, devant être installé sur le site SEM-REV, au large du Croisic dans 33m d'eau. Ce concept répond au problème d'un assemblage à quai mais n'est pas performant en place car les volumes du flotteur sont près de la surface d'où des performances dynamiques médiocres (réponse à la houle) et des efforts d'ancrages relativement importants.

2.2.3- Projet GROIX et BELLE ILE : 4 machines de 6 MW, projet porté par EOLFI et CGN-Europe, NAVAL GROUP/VINCI, flotteurs du type semi-submersible métallique, 73 m de côté et 36m de haut ; 6 lignes de mouillage ; Hauteur totale : 170 m (mat : 80m) ; rotor 150m ; Turbines GE Haliade 150 de 6 MW ; à 13 km de la cote ; 70m d'eau. Les flotteurs sont de type « semi-submersible », avec trois flotteurs métalliques assez profonds (la plateforme est ballastée en eau, une fois en place) reliés à des caissons à la partie inférieure, qui permettent un tirant d'eau réduit le long d'un quai. Ces caissons participent à l'amortissement en roulis.



Projet Groix-Belle Ile (NAVAL GROUP/VINCI) – Flotteur type semi-submersible

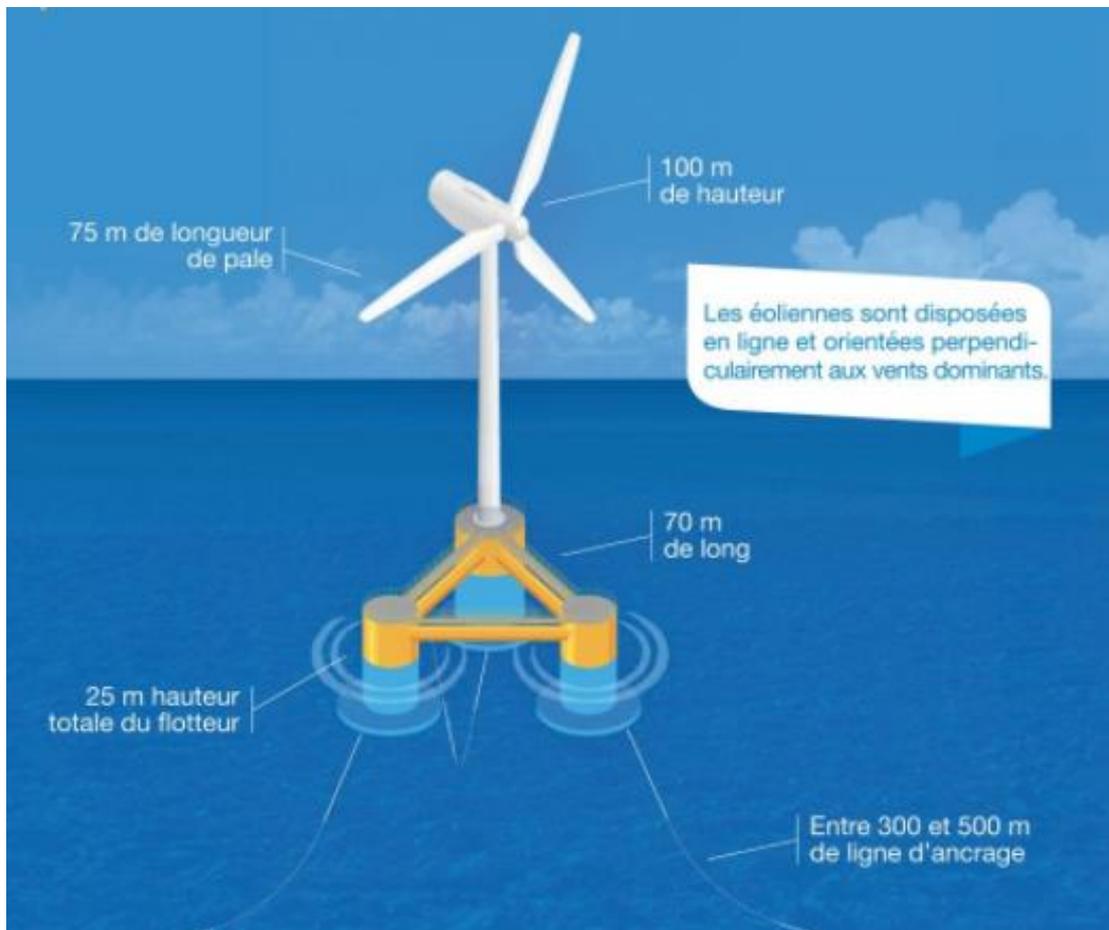
2.2.4- Projet PROVENCE GRAND LARGE :au large de cap FARAMAN, porté par EDF ENERGIES NOUVELLES et partenaires avec 3 éoliennes de 8 MW SIEMENS à 17 km de la côte dans 100 m d’eau, avec un flotteur du type « TLP » conçu par SBM/IFP-EN (1700 tonnes ,6 lignes d’ancrage à câbles sur les ancrs gravitaires et à succion). Le flotteur est constitué de trois flotteurs métalliques sous-marins reliés par des bracons (poids de la structure équipée : 1850 tonnes) plus un flotteur central et ancré par des lignes tendues pratiquement verticales fixées sur des ancrs à succion ; Le principal avantage de ce concept breveté est son très faible mouvement (pas de pilonnement ; la disposition des lignes fait que la plateforme a même tendance à s’incliner vers l’avant sous les efforts du vent et des vagues). Le flotteur permet un assemblage de l’unité le long d’un quai ; cependant, les opérations marines de raccordement du flotteur avec son ancrage est un peu plus compliqué qu’avec un flotteur semi-submersible.



Projet Grand Large (Turbine 8 MW) – Flotteur type TLP (IFP-EN/SBM)

2.2.5- Projet EFGL au large de LEUCATE, porté par ENGIE avec EDP Renewables (Portugais), CDC, Eiffage ; 4 machines GE Haliade de 6 MW ; le flotteur est du type « semi-submersible » classique conçu par Principle Power Inc, dont le prototype a été testé au Portugal récemment. Le concept WINDFLOAT a trois flotteurs

cylindriques reliés par des bracons et des anneaux antiroulis à la base de chaque flotteur. Un système de transfert de ballast est prévu pour compenser l'inclinaison moyenne de l'unité, qui dépend du vent moyen...Les turbines pourraient fonctionner avec une inclinaison de 10 degrés, mais au détriment de leur performance. Le dimensionnement des flotteurs permet un assemblage à quai. Le mat de la turbine se trouve sur un des flotteurs. Le flotteur est ancré par trois ou six lignes caténaires et des ancres classiques.



Projet EFLG (Leucate) Flotteur type semi-submersible

3 - REVUE DES PARTICULARITES DES EOLIENNES FLOTTANTES (ASPECTS TECHNIQUES)

- **Les flotteurs** : Les divers types de flotteurs ont été décrits à la section 2, avec chaque projet-pilote. Cette partie des éoliennes flottantes représente environ 35% du coût d'investissement et est la partie spécifique à chaque projet, les autres parties (Turbine, mat, câble sous-marin) étant très similaires d'un projet à l'autre. L'ancrage du flotteur est également spécifique au flotteur et représente encore 10 % environ du coût d'investissement. C'est donc par le flotteur et son ancrage que les développeurs se distinguent ; Le flotteur doit minimiser les mouvements de l'unité flottante tout en permettant son assemblage (y compris le mat, la nacelle et le rotor) le long d'un quai, si possible (sauf pour les « Spar »). (La puissance nominale est atteinte à partir de 12 m/s, soit force 6 Beaufort).

- **Les turbines** : Deux constructeurs dominent le marché : SGRE (SIEMENS GAMESA RENEWABLE ENERGY) (SIEMENS a racheté les activités d'ADWEN –AREVA et GAMESA-), et VESTAS ; GE a racheté les activités d'ALSTOM. Tous les constructeurs développent des machines de plus en plus grosses : 5 à 6 MW pour les derniers projets d'éoliennes fixes, 6 à 8 MW pour les fermes-pilotes d'éoliennes flottantes, envisageant 12 MW pour le futur proche (projet GE Haliade X pour 2021 : hauteur totale : 260 m ; pales de 107m). Le rotor d'une machine de 8 MW fait 160 m de diamètre et tourne de 4 à 11 tours/minute. La vitesse en extrémité des pales atteint donc 90m/s, soit 330 Km/h. La nacelle avec son rotor et ses pales pèsent près de 400 tonnes, le tout à 110 m au –dessus de la mer. Tous ces poids et dimensions sont possibles pour les éoliennes offshore, assemblées sur quai dans des chantiers navals et remorquées en mer avec des moyens similaires à ceux utilisés dans l'offshore pétrolier ; ce n'est pas le cas pour les éoliennes à terre où le problème du levage à partir de grues terrestres mobiles est limité et où le transport de pales sur les routes est une contrainte supplémentaire ; de ce fait, les projets onshore sont limités à 2,5 MW en général. La turbine est la partie la plus critique et la plus complexe d'une éolienne et contenant de nombreux équipements électriques et mécaniques ; leur fiabilité critique et leur maintenance difficile ; pour augmenter la fiabilité, les constructeurs ont développé récemment des modèles de turbines sans multiplicateur : le générateur est directement accouplé au rotor et donc tourne lentement ; le générateur est à aimants permanents et à basse tension (environ 1000 volts). Le matériel électrique et les transformateurs sont alors situés en pied de mat, donc plus accessibles.

- **Performances** : les emplacements du Golfe du Lion étant particulièrement favorables pour le vent, les développeurs visent un taux de charge (aléas et temps de maintenance inclus) de 40 à 45% (à comparer aux éoliennes terrestres qui ont en moyenne un taux de charge de 23% en moyenne). Pour mémoire, le taux de charge est le rapport entre la puissance moyenne sur une année et la puissance maximum. Les nouvelles turbines de forte puissance (6 et 8 MW unitaire) ont des courbes de charges permettant une plage d'utilisation importante : typiquement de 5 à 25 m/s (force 3 à 9 sur l'échelle Beaufort)

- **Emplacements** : Les éoliennes flottantes permettent de s'affranchir du problème de la profondeur, et à partir de 50m environ l'option flottant semble plus économique que l'option « fixe ». Ceci permet une plus grande flexibilité pour choisir l'emplacement des champs qui peuvent être plus éloignés de la côte. Pour les projets-pilotes ci-dessus, le golfe du Lion a été choisi pour 3 projets sur 4 car il est particulièrement venteux (Tramontane) et les vagues sont modérées et de période courte (du fait que le vent vient de terre : le « fetch » est faible). La côte Atlantique, contrairement à ce qu'on peut penser, n'est pas si favorable : vents moyens parfois forts, multidirectionnels, et houle forte de l'Atlantique. Pour des considérations de coût et éviter une plateforme intermédiaire, les 4 fermes-pilotes ne sont pas très éloignées du rivage (15 à 20 km). Au-delà des aspects techniques, les développeurs ont dû prendre en compte les contraintes imposées par les autres utilisateurs de la mer : navigation commerciale, zones de pêche, couloirs aériens, zones de couvertures des radars côtiers et aériens, etc., ce qui nécessite de nombreuses réunions

préliminaires, sans compter les associations de riverains, inquiets de l'impact visuel entre autre). L'argument principal est que les éoliennes flottantes ne seront pas ou peu visibles de la côte et qu'il y aura peu de réticences de la part de la population locale, comme on l'observe actuellement en France pour les développements terrestres et même certains développements d'éoliennes fixes.

Les éoliennes sont espacées de 500 m à 1000m ; pour les projets du golfe du Lion, elles sont disposées selon une ligne, face au vent dominant (Tramontane, venant du NO). Pour les fermes commerciales (50 à 100 machines), l'espacement dans les deux sens devra tenir compte de l'effet de sillage des rotors, d'où un espacement de 3 à 5 fois le diamètre, soit 500 mètres à 1000m, ce qui donne une zone de 5 x 5 à 10 x 10 km pour 100 machines de 8 MW. L'accès à la zone sera défini pour chaque projet : par exemple, l'accès pourrait être complètement interdit ou n'être autorisé que pour les navires de plaisance et la pêche entre deux eaux (pas de chalutage du fait des ancrages et des câbles, bien qu'ils soient ensouillés).

- **La maintenance** : La maintenance des éoliennes flottantes est encore plus difficile que celle des éoliennes fixes car la nacelle, perchée à plus de 100m au-dessus de l'eau, bouge ; les techniciens –ceux qui n'ont pas le mal de mer- ne peuvent faire que des petites opérations de maintenance. D'où les efforts des concepteurs des flotteurs pour réduire les mouvements. Les conceptions proposées actuellement dans le cadre des fermes-pilotes permettent d'amener et de ramener les unités flottantes complètes le long d'un quai pour maintenance « lourde » (prévue au bout de dix ans). Cependant, ces opérations nécessitent du beau temps et des remorqueurs. Qu'en sera-t-il pour une ferme commerciale avec au moins 50 unités en mer ? La vraie réponse aux problèmes de maintenance reste la fiabilité des équipements, en particulier de tous les équipements mécaniques, électriques et instrumentation dans la nacelle ; Il faudra une période d'apprentissage et de mise au point avant que la fiabilité soit au rendez-vous pour les fermes commerciales. C'est tout l'intérêt des fermes-pilotes décidées récemment.

- **Le raccordement électrique vers la terre** : Les éoliennes offshore des fermes-pilotes achemineront leur production électrique vers la terre par un câble sous-marin en 33 KV ou 66 KV triphasé. Ce câble sera enfoui ou protégé par des « matelas » d'éléments en béton ; l'atterrissage est enfoui éventuellement en passant par un forage dirigé à partir de la plage pour déboucher à une profondeur suffisante. Les câbles ont une partie dite « dynamique » (en forme de « S » horizontal avec des éléments de flottabilité) au niveau du raccordement avec l'unité flottante pour s'accommoder des mouvements du flotteur. Le câble partant de chaque plateforme doit pouvoir être déconnecté lorsque celle-ci est ramenée à terre pour maintenance lourde : pour les fermes-pilotes où les unités sont raccordées en guirlande, certains concepteurs proposent des solutions de raccordement provisoire pour éviter que l'enlèvement d'une unité ne provoque la mise hors service des autres unités adjacentes. Pour les fermes commerciales, une plate-forme particulière collectera l'ensemble des câbles venant de chaque éolienne, augmentera la tension et enverra toute la production du champ par un ou deux câbles (typiquement 225 KV) vers la terre.

4 - LES COÛTS ET FINANCEMENTS DES PROJETS-PILOTES

Les 4 projets-pilotes d'éoliennes flottantes en mer ont été lancés en 2015 par l'ADEME et attribués au cours du deuxième semestre 2016. Un certain nombre d'éléments étaient imposés : emplacements (Un en Atlantique, trois dans le Golfe du Lion, nombres de machines : 3 à 6 de 5 MW minimum ; point de raccordement sur la côte, prix d'achat de l'électricité entre 230 et 250 €/MWH etc.) Le coût d'investissement initial pour ce type de projet est d'environ 200 M€ pour quatre unités y compris le raccordement électrique vers la terre (câble offshore et onshore) coûtant environ 30 M€. L'aide financière demandée varie entre 30 à 40 % (45% maxi autorisé) de l'investissement et comporte une subvention pour

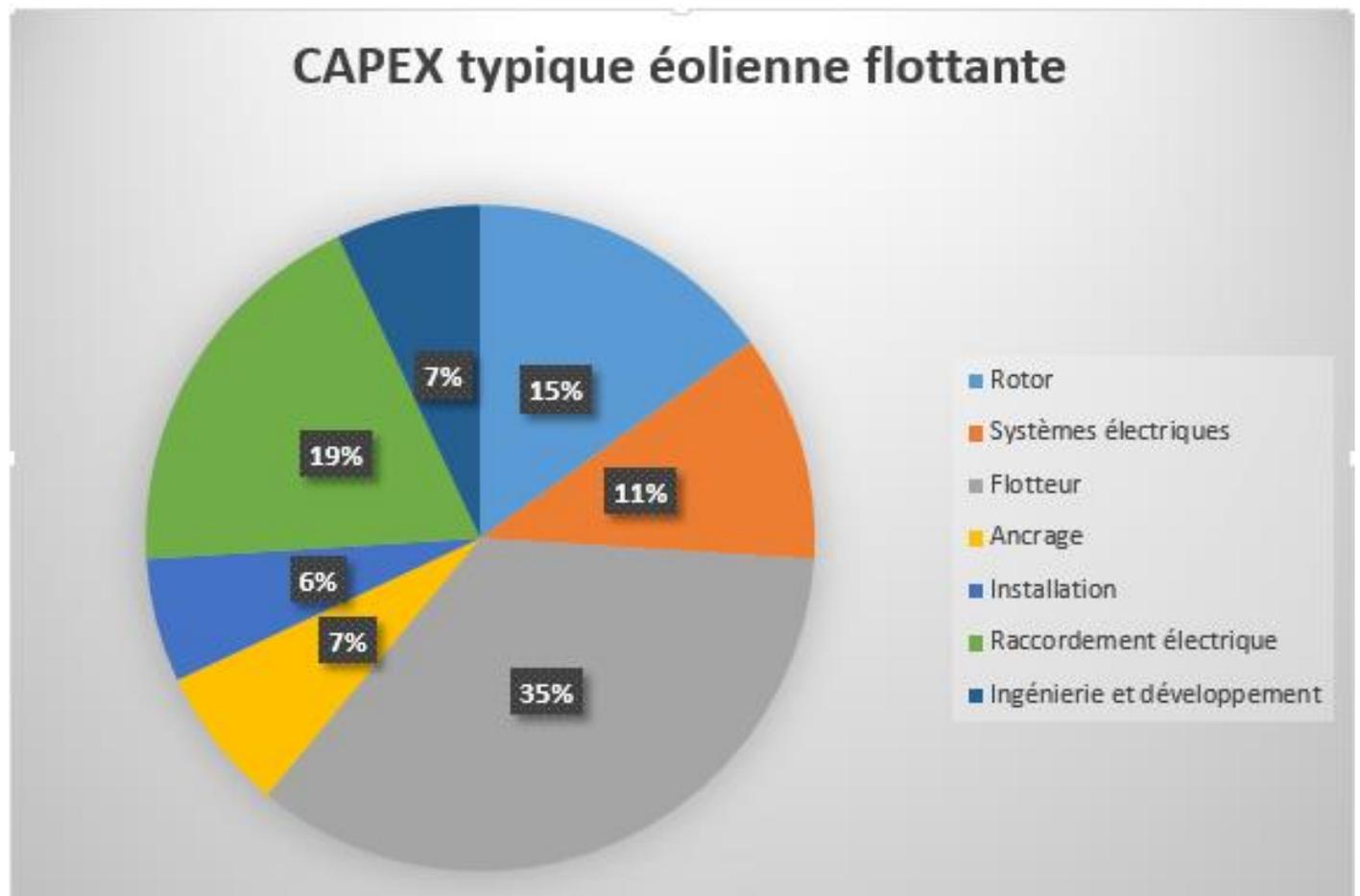
un tiers et une avance remboursable pour deux tiers; l'aide porte également sur le tarif de rachat de l'électricité produite (230 à 250 €/MWH). L'aide demandée fait partie de critères de sélection des offres pour l'appel à projets. Le montage financier doit ensuite faire l'objet d'un dossier à approuver par les instances de l'Union Européenne du fait de l'aide financière au niveau national.

Pour le futur, il reste à faire des efforts pour arriver au niveau des éoliennes offshore fixes (fermes commerciales) dont le tarif de rachat de l'électricité est d'environ 190 €/MWH en France et 130 €/MWH au Danemark. (Un projet commercial vient d'être attribué au Danemark avec moins de 60 €/Mwh).

Les coûts d'investissement sont encore très élevés (7 M€/MW installé) pour les fermes pilotes présentées. (La ferme-pilote d'éoliennes flottantes HYWIND (5 x 6 MW) au large de l'Ecosse est annoncé à 248 M \$ =218 M€ environ, du même ordre de grandeur que les projets français).

5 - PLANNING DES PROJETS

Le retard pris par la France dans les développements des éoliennes offshore tient essentiellement aux contraintes imposées aux développeurs des projets : il est reconnu qu'à ce jour les projets des éoliennes offshore fixes vont prendre dix ans environ, entre la soumission des offres lors de l'AMI (Appel à Manifestation d'Intérêt, lancé par l'ADEME représentant l'Etat) et la première production d'électricité. L'Etat en est conscient et a décidé de modifier le processus, visant à réduire ce délai à 6 ou 7 ans pour les projets futurs. L'objectif est « de sécuriser et d'accélérer le développement des projets en menant le débat public en amont de la procédure d'appel d'offres, ainsi que les études techniques et environnementales, sous la maîtrise d'ouvrage de l'Etat ». Ainsi, au moment où l'appel d'offres sera attribué, toutes les autorisations, environnementales et d'occupation du domaine maritime, seront délivrées au lauréat, alors qu'aujourd'hui un candidat qui se voit attribuer un parc, n'a pas la garantie d'obtenir toutes les autorisations. Le lauréat sera titulaire d'un « permis enveloppe » qui lui permettra de modifier et d'adapter son projet dans les limites définies.



6 - PERSPECTIVES POUR LES EOLIENNES FLOTTANTES.

Le scénario « bas » mondial pour les éoliennes flottantes pour 2030 évalué par un développeur est le suivant : Japon : 4GW ; France : 2,5 GW ; Taïwan : 3 GW ; UK : 2 GW ; USA : 1,5 GW ; Portugal : 2 GW ; Chili : 1,3 GW ; Chine : 1,1 MW, etc.

Le développement de l'éolien flottant s'inscrit dans le développement de l'éolien offshore (fixe et flottant). Le gouvernement français retravaille sur les objectifs pour la puissance installée de l'éolien offshore fixe et flottant, qui était de 6 GW en 2020, revu maintenant à 3 GW (soit 3000 unités de 6 MW), visant 15 GW à l'horizon 2030.

Enfin, il reste l'aspect coût : grâce à l'expérience et l'effet de série, les développeurs espèrent faire passer le prix de rachat de la production de 250 €/MWH pour les fermes –pilotes flottantes à 110 €/MWH pour les fermes commerciales, ce qui est le prix estimé pour l'électricité nucléaire à moyen terme (EPR de Hinckley Point).

Dans quelques années, nous verrons peut-être des fermes commerciales d'éoliennes flottantes dans le golfe du Lion et sur notre façade atlantique ...