

L'éolien flottant, une chance pour la France

MARC LANNE¹, BENJAMIN DELAGE², GEORGES COLBOC³

¹EXPERT MARITIME EN CHARGE DES RELATIONS EXTÉRIEURES, ²EXPERT FLOTTEUR, ³RESPONSABLE INGÉNIERIE ÉLECTRIQUE EOLFI

ABSTRACT

By escaping depth constraints, the floating offshore wind energy allows the installation of offshore wind farms far from coast, where winds are the strongest and the most stable. Its performances have been demonstrated under real conditions since 2009, the first floating pre-commercial wind farm having been installed at sea in 2017 in the Scotland. The floating wind energy represents a great asset for the energy transition in France, directly usable from 2018:

- due to a great potential, this energy can constitute the relay of the nuclear electric production whose share in the electricity mix is expected to decline ;
- It offers an exceptional potential for export.

France has a short-term accessible competitive energy there, provided that a general mobilization supports its development. This offshore wind energy relies on standard wind turbines, already checked, of which the power and the yields keep on growing: the six first fixed offshore wind farms in France will be built with 6 or 8 MW nacelles. Wind turbine prototypes of 10 and 12 MW are already prepared by the different turbine providers and a 15 MW wind turbine is already evoked, maybe more...

The second support comes from floaters technologies issued from the Oil & Gas offshore sector, in which France may count on a world leading experience. Actually, the floating wind energy combines mature industries which secure its future. The floating wind energy presents all the necessary qualities to meet all the energy challenges which France must answer.

RÉSUMÉ

En s'affranchissant de contraintes de profondeur, l'énergie éolienne offshore flottante permet l'installation de parcs éoliens au large loin de la côte, où les vents sont forts et stables. Ses performances ont été démontrées en conditions réelles depuis 2009, le premier parc éolien pré-commercial flottant a été installé en 2017 en Écosse. L'énergie éolienne offshore flottante représente un vecteur essentiel de la transition énergétique en France, directement utilisable dès 2018 :

- en raison de son potentiel élevé, cette énergie peut constituer un relais à la production électrique nucléaire dont la part dans le mix électrique est appelée à décliner ;
- elle offre un potentiel exceptionnel à l'export.

La France dispose là d'une énergie compétitive accessible à court terme, à condition qu'une mobilisation générale accompagne son développement. Cette énergie éolienne offshore repose sur des turbines standard, déjà éprouvées, dont la puissance et les rendements continuent de croître : les six premiers parcs éoliens offshore fixes en France seront construits avec des nacelles de 6 ou 8 MW, plusieurs prototypes de 10 et 12 MW sont en préparation, une éolienne de 15 MW est évoquée...

Le second soutien vient de la technologie des plates-formes flottantes, développée grâce au secteur offshore pétrolier et gazier, la France pouvant compter sur l'expérience de ses leaders mondiaux. Finalement, l'énergie éolienne flottante allie des industries matures qui sécurisent son avenir. L'énergie éolienne flottante présente ainsi toutes les qualités nécessaires pour respecter les enjeux énergétiques auxquels la France doit répondre.

Introduction

Plus de 4 000 éoliennes sont posées sur le fond de la mer en Europe du Nord. Exploitées depuis 10 à 20 ans, essentiellement au Royaume-Uni et en Allemagne, elles sont l'expression d'une industrie mature et offrent des retours d'expérience particulièrement riches en enseignement.

L'éolien flottant ouvre de nouvelles perspectives de développement. Il permet l'installation de fermes éoliennes en mer loin des côtes, là où les vents sont plus forts et plus stables. Ses performances, démontrées en conditions réelles depuis 2009¹, font de cette

énergie un atout très important pour la transition énergétique et celle de la France en particulier. L'éolien flottant hérite de l'éolien posé mais s'appuie également sur l'expérience de l'offshore pétrolier, secteur dans lequel l'industrie française compte parmi les leaders mondiaux (TechnipFMC, Subsea 7, SBM Offshore, Doris Eng...).

L'offshore posé (ou fixe) est limité à 50 m de profondeur environ ; au-delà, les investissements deviennent extrêmes. Avec cette technologie, on continue à bâtir sur place, comme pour le terrestre. C'est l'origine du développement significatif des navires de type « Jack-up » qui se hissent sur leurs quatre jambes pour construire. La différence

avec le flottant, installé entre 50 m et 300 m de profondeur voire davantage, c'est que tout est construit au port : on fabrique sur un quai, on met à l'eau puis on assemble la turbine, stockée à proximité, sur le flotteur, le long d'un quai. Ensuite, il n'y a plus qu'à remorquer l'ensemble vers des champs offshore suffisamment éloignés.

L'avantage de ces champs réside dans plusieurs paramètres :

- dans un contexte géographique régulier, où les vents laminaires sont meilleurs au large car non handicapés par le relief, le rendement (facteur de charge) peut quasiment doubler en haute mer (45 à 55 %) par rapport à la terre (21 %). À titre d'exemple, pour la

¹ Ferme éolienne Hywind de StatoilHydro, installée depuis 2009 en mer du Nord, et Wind-Float, de 2011 à 2016 au large du Portugal.

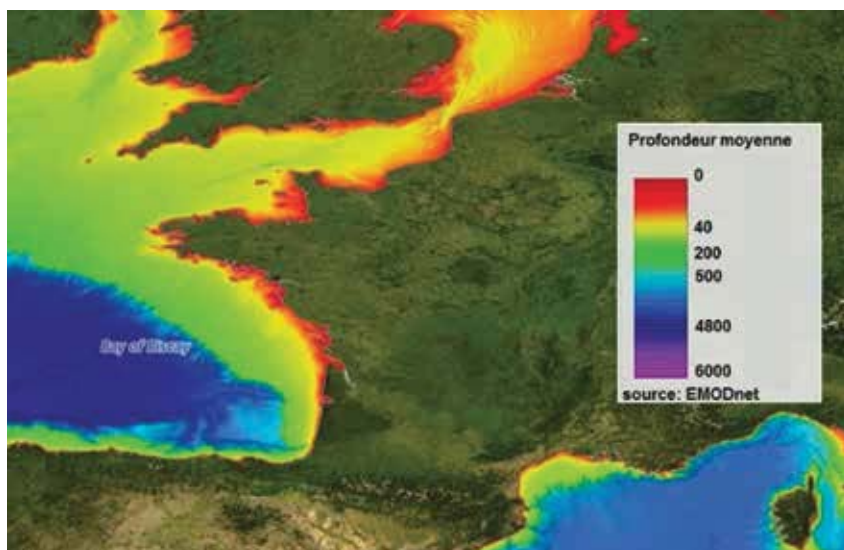


Figure 1 : Carte de répartition des profondeurs en mer – Source : EMODnet.

première ferme flottante Hywind installée en Ecosse, il a même atteint 65 %² pendant les mois d'hiver.

- Le fait d'être éloigné confère à ces fermes un caractère massif : on peut rassembler 500 MW, soit 50 éoliennes aujourd'hui, et seule la capacité d'absorption pour se raccorder au réseau terrestre (RTE) devient limitante.

Certes, l'énergie éolienne reste une ressource variable. Mais la France dispose de plusieurs façades maritimes, soumises à des régimes de vent différents, en Méditerranée (Tramontane, mistral) ou en Atlantique (Ponant). Si un volume important est inscrit dans la PPE pour la période 2019-2023 sur ces différentes façades, un foisonnement interviendra *de facto* dans la production, parfaitement absorbable par le réseau de forte puissance.

L'éolien flottant est prédictible et déployable à grande échelle ; il sera compétitif à court terme, pourvu qu'on amorce la chaîne industrielle avec un volume significatif. Le fait d'être localisé dans des ports peut amener à une création d'emplois à forte valeur ajoutée, non délocalisables, constituant une

² Il convient toutefois de mesurer sur l'année entière.

source d'optimisation industrielle donc de diminution des coûts.

L'énergie éolienne offshore posée a vu sa compétitivité progresser de façon spectaculaire au cours des dernières années, plus rapidement qu'anticipé. L'éolien flottant suivra une évolution analogue d'autant plus rapidement que de gros volumes seront alloués au marché (plusieurs GW). Au Royaume-Uni, le prix de revient de l'éolien en mer est tombé aussi bas que 53 €/MWh³. En France, nous pensons qu'il est possible de viser une même dégressivité des coûts pour l'éolien flottant. Avec un volume significatif attribué (6 GW), l'éolien flottant sera en mesure d'atteindre un coût inférieur à 80 €/MWh⁴ en 2030, le temps que la filière industrielle se mette en place.

Un potentiel considérable pour la France et dans le monde

L'éolien flottant permet l'installation de fermes éoliennes sur les plateaux

³ BBC, Offshore wind power cheaper than new nuclear, septembre 2017, <https://www.bbc.com/news/business-41220948>

⁴ Hors coûts de raccordement, pour une ferme éolienne flottante de 500 MW lauréate d'appel d'offres entre 2025 et 2030 – IEA Wind, juin 2016.

continentaux, en s'affranchissant de la profondeur d'eau, au-delà de 50 m de profondeur. De nouveaux secteurs maritimes jusque-là inexploités par l'éolien sur fondations posées s'ouvrent ainsi (en vert sur la figure 1).

En France

Avec 3 500 km de côtes, et trois façades maritimes ventées, la France métropolitaine bénéficie de conditions géographiques très favorables au développement de l'éolien en mer. C'est le 2^e gisement éolien d'Europe, derrière la Grande-Bretagne. Le potentiel techniquement exploitable pour l'éolien flottant est considérable, dont une part significative (16 GW) pourrait être mise en service d'ici 2040. À l'horizon 2030, 6 GW d'éolien flottant sont raccordables, principalement en Méditerranée (golfe du Lion) et en Bretagne.

Dans le monde

À l'image de la France, le potentiel exploitable de l'éolien flottant est mondial. Estimé à 40 GW pour l'Europe à l'horizon 2030, il est également important en Asie (Taiwan, Japon et Chine) et aux États-Unis et pourrait atteindre 250 GW sur 30 ans. Certains de ces pays investissent massivement dans l'éolien en mer, ouvrant des perspectives de marché intéressantes pour les industriels français.

Une nouvelle filière industrielle française

Sous l'impulsion du Gouvernement, plusieurs projets offshore ont été lancés à la suite des appels d'offres de 2012 et 2013. Des investissements très importants, humains et financiers, ont été réalisés. Cette nouvelle filière industrielle commence à se structurer, avec des compétences spécifiques. L'éolien flottant apporte une composante nouvelle et permettra de développer l'activité des



Figure 2 : Visuel 3D de la ferme pilote flottante de Groix et Belle-Île - Crédit : Naval Energies.

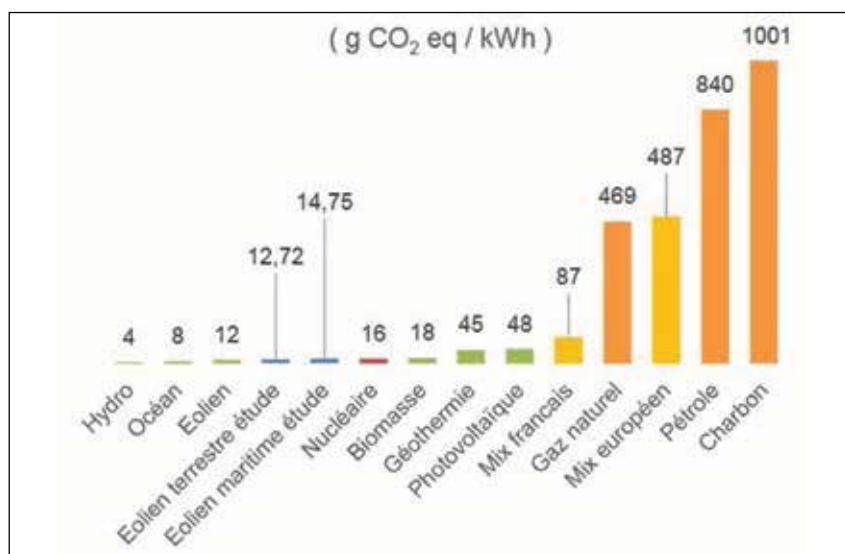


Figure 3 : Emission de CO₂ par kilowattheure des différentes énergies.
Source : Etude ACV Cycleco pour l'ADEME (déc. 2015) - Source : ADEME.

ports près des implantations offshore, comme Fos-sur-Mer, Port-la-Nouvelle, Brest, Saint Nazaire... L'industrialisation de série des grands ensembles (flotteurs et sous-stations électriques) y sera implantée, ce qui entraînera une baisse significative des coûts de construction. L'installation s'effectuera selon un processus optimisé, les éoliennes flottantes seront assemblées intégralement au port, remorquées au large avant d'être amarrées, induisant mécaniquement des

coûts d'installation compétitifs. La maintenance des parcs éoliens fera intervenir des entreprises locales. Des emplois non délocalisables seront ainsi créés sur les territoires pour l'aménagement des parcs, les travaux de génie civil, la construction et le stockage des composants d'éoliennes, l'assemblage de fondations, l'installation en mer, la connexion au réseau électrique, la maintenance des parcs, etc.

Disposant du 2^e espace maritime mondial, riche d'une expertise en ma-

tière énergétique, portuaire et maritime unique, avec des usines qui produisent déjà et d'autres qui s'apprêtent à ouvrir, notre pays a les cartes en mains pour structurer une filière créatrice d'emplois et d'activités économiques, en France comme à l'international.

De nombreux métiers sont liés à l'éolien : certains se rapprochent de l'aéronautique, d'autres de la maintenance industrielle, d'autres encore du tertiaire. Les compétences les plus diverses sont requises, en matière d'ingénierie, de génie civil, de levage, d'écologie, d'architecture, d'acoustique ou d'éthologie... Ainsi, de nouvelles formations émergent un peu partout en France : conception et construction de turbines et flotteurs, maintenance terrestre et offshore, ingénierie des fermes...

L'éolien flottant est un domaine technologique de pointe. Les encadrés joints en annexe à cet article donnent un aperçu des techniques qui doivent être mises en œuvre et que l'industrie française est apte à maîtriser compte tenu de ses capacités et de son expérience dans des domaines connexes.

Des bénéfices environnementaux

Une énergie bas carbone

L'éolien en mer est une des énergies les moins émettrices de gaz à effet de serre sur l'ensemble du cycle de vie d'un projet (fabrication, installation, production, démantèlement).

De plus, contrairement à d'autres formes d'énergie, l'éolien flottant repose sur le vent, une ressource locale, inépuisable et qui ne génère pas de déchets. Les éoliennes et les flotteurs sont à 90 % recyclables.

Des impacts limités sur l'environnement

L'éolien en mer bénéficie d'un important retour d'expérience des parcs en fonctionnement en Europe du Nord qui

ont fait l'objet de suivis environnementaux sur plusieurs années. Les rapports concluent à des impacts très réduits sur la faune et la flore marine, liés essentiellement aux phases de travaux en mer. Pour l'éolien flottant, ces impacts seront réduits puisque l'essentiel des travaux sera effectué au port. En phase d'exploitation, les structures immergées vont probablement jouer un rôle d'effet récif permettant l'accroissement de la biomasse marine (réserve de nourriture pour les poissons et leurs prédateurs, accroissement de la diversité des espèces).

Enfin, en termes de paysage, l'éolien flottant permet de s'éloigner des côtes de manière significative limitant ainsi l'empreinte visuelle.

Conclusions et perspectives

En se libérant des contraintes de profondeur, l'éolien flottant se démarque de son concurrent l'éolien offshore posé, dont il est le complément par grands fonds. L'éolien flottant, en effet, va permettre l'installation de fermes éoliennes au large, loin des côtes, là où les vents sont forts et stables. Ses performances ont été démontrées en conditions réelles depuis 2009, la première ferme pré-commerciale a été mise en service en 2017 en Ecosse. L'éolien flottant représente un très grand atout pour

la transition énergétique en France, valorisable dès 2018 :

- grâce à un formidable gisement, il peut constituer un relais à la production électrique nucléaire dont la part dans le mix électrique doit diminuer ;
- il présente un potentiel exceptionnel à l'export.

La France dispose là d'une énergie compétitive à court terme, accessible à condition qu'une mobilisation générale accompagne son développement. Cette énergie éolienne offshore s'appuie sur des éoliennes standard, aujourd'hui dégagées des risques qui leur étaient attachés, dont la puissance et les rendements ne cessent de s'améliorer : les six premiers champs posés en France se construiront avec des turbines de 6 ou 8 MW. Les prototypes de 10 et 12 MW sont déjà sur la table à dessin des bureaux d'études. Et on évoque déjà une éolienne de 15 MW voire davantage... Le deuxième soutien provient des technologies de flotteurs issues de l'offshore pétrolier, secteur dans lequel la France peut compter sur l'expérience de leaders mondiaux. L'éolien flottant permet de donner un second souffle à des industries matures qui sécurisent son avenir. Il présente toutes les qualités nécessaires pour faire face aux défis énergétiques auxquels la France doit répondre.

LES AUTEURS

MARC LANNE est directeur des relations maritimes et extérieures chez EOLFI depuis 2013. Sa première carrière s'est déroulée au sein de la Marine Nationale où il a commandé plusieurs bâtiments de guerre. Il a ensuite entraîné l'ensemble de la flotte de surface, puis dirigé le cabinet du chef d'Etat-major de la Marine. Diplômé ingénieur de l'école navale et de l'école de guerre, il a également été auditeur au collège de défense de l'OTAN à Rome. En 2013, il a exercé les fonctions de conseiller maritime chez AILES MARINES pour le champ offshore posé de St-Brieuc.

BENJAMIN DELAGE, ingénieur mécanique diplômé de l'école centrale Marseille en 2003, est expert flotteur et responsable des lots flotteurs chez EOLFI depuis 2017. Il travaille dans le secteur de l'énergie depuis 15 ans et plus particulièrement dans l'éolien offshore posé et flottant depuis huit ans.

GEORGES COLBOC est expert électrique en charge du raccordement chez Eolfi depuis 2017 avec dix ans d'expérience dans le milieu éolien à différents postes de responsabilité. Précédemment en poste chez le développeur et fabricant d'éolienne offshore ADWEN, il a été responsable de la conception électrique moyenne et haute tension de la turbine 8MW pour laquelle un prototype a été installé dans le nord de l'Allemagne.

Les flotteurs

Les supports flottants pour éoliennes

La technologie des flotteurs pour l'éolien est inspirée de solutions éprouvées dans l'industrie pétrolière et se compose d'une multitude de solutions différentes. Le choix d'un flotteur dépendra des conditions de site, des capacités d'industrialisation et des contraintes locales.

pour une hauteur de 30 m environ ; le tirant d'eau varie entre 8 et 20 m selon le ballastage ;

- le type TLP joue entièrement contre Archimède, car il est étanche et immergé en force, avec une forte flottabilité positive. Il présente l'avantage de peu bouger,



Figure 4 : De l'éolien posé à l'éolien flottant – Crédit : Josh Bauer/NREL – Department of Energy.

Les flotteurs trouvent leur stabilité grâce à :

- leur géométrie et de la surface traversant la surface de l'eau (semi-submersibles et barges) ;
- un ballast (flotteur de type SPAR ou pendulaire) ;
- des lignes d'ancrage tendues.

Les trois grandes catégories de flotteurs sont les suivantes : Spar, semi-submersible et TLP (Tension Leg Platform) :

- le type Spar (cylindre de 80 m de haut pour un diamètre de 8 m) a des qualités marines indéniables (mouvements amples et lents), mais est peu pratique d'emploi en raison de son tirant d'eau excessif, quasiment réservé à la Norvège (fjords) ;
- le type semi-submersible (incluant les barges) est le plus couramment rencontré, les lignes d'ancrage pouvant participer à la stabilité du flotteur. Les formes, souvent triangulaires, s'inscrivent dans un cercle de diamètre 80 m

mais l'ancrage et son installation peuvent se révéler délicats voire chers. Il a un avantage spatial : les longueurs d'amarrage étant très tendues, il occupe peu de surface sur le fond.

Ces différents types de flotteurs peuvent être ancrés de différentes façons sur le fond, il existe 3 grandes catégories d'ancrage :

Les mouillages de type caténaire

Ce mouillage est le mouillage des navires et est composé principalement de chaînes. Sa fonction d'ancrage est principalement remplie grâce au poids des chaînes suspendues dans la colonne d'eau. La ligne d'ancrage prend la forme d'une chaînette et peut-être modifiée pour améliorer les performances de l'ancrage (diminuer ses excursions ou les efforts sur l'ancrage et le flotteur) en ajoutant des segments de câble textile ou acier dans la ligne d'ancrage ou des poids



Figure 5 : Catégories de flotteurs - Crédit : South West – Offshore Floating Wind – Design and Installation.

ponctuels. L'ancre d'un mouillage de type caténaire reprend principalement des efforts horizontaux, c'est pourquoi une grande variété d'ancres peut être utilisée :

- les ancres à enfouissement, type mouillage de navire, qui ne peuvent reprendre que des charges horizontales, sont les ancres les plus simples à installer ;
- les ancres gravitaires, qui peuvent reprendre des charges horizontales et verticales de par leur poids et les efforts de friction sur le sol ; ce type d'ancre est souvent utilisé pour les mouillages permanents de navires ;
- des pieux enfoncés dans le sol qui peuvent aussi reprendre des efforts horizontaux et verticaux par l'intermédiaire de la résistance du sol dans lequel ils ont été enfoncés ou forés.

Les avantages de ce type d'ancrage sont la simplicité, la facilité d'installation et la robustesse. L'inconvénient réside dans une excursion importante qui impose une conception plus coûteuse pour les câbles d'export électrique.

Les mouillages de type tendu

Ces mouillages sont utilisés pour les plates-formes à ancrage tendu composé de lignes tendues qui confèrent la stabilité au flotteur. En raison des efforts verticaux importants rencontrés dans ce type de mouillage, les ancres à enfouissement ne sont pas utilisables.

- Avantage : faible excursion du flotteur permettant de simplifier la conception des câbles d'export électrique ;

- Inconvénient : installation coûteuse et risque important pour la stabilité du flotteur en cas de rupture d'une ligne d'ancrage.

Les mouillages semi-tendus

Il existe des mouillages semi-tendus qui sont des solutions intermédiaires entre les deux précédentes.

Un système complexe à concevoir

Lors de la conception et du choix d'un flotteur, il est important de prendre en compte de nombreuses contraintes et les interactions de ce sous-système avec les autres composantes du système global que sont l'éolienne et le câble d'export dynamique d'électricité. L'objectif consiste à maximiser la production d'électricité en réduisant les coûts de maintenance et les investissements initiaux. La figure 6 illustre la complexité de l'ensemble des contraintes à prendre en compte dans le choix et la conception d'un flotteur.

L'analyse intégrée des charges, incluant le flotteur, son ancrage et la turbine, est la clef de l'optimisation du design du flotteur. Actuellement les éoliennes sont des produits sur étagère adaptés à l'éolien fixe et donc inadaptés aux contraintes liées aux mouvements du flotteur. Le premier moyen pour adapter l'éolienne au flottant sans à avoir à relancer un programme complet de qualification de la turbine est d'adapter les systèmes de contrôle-commande pour

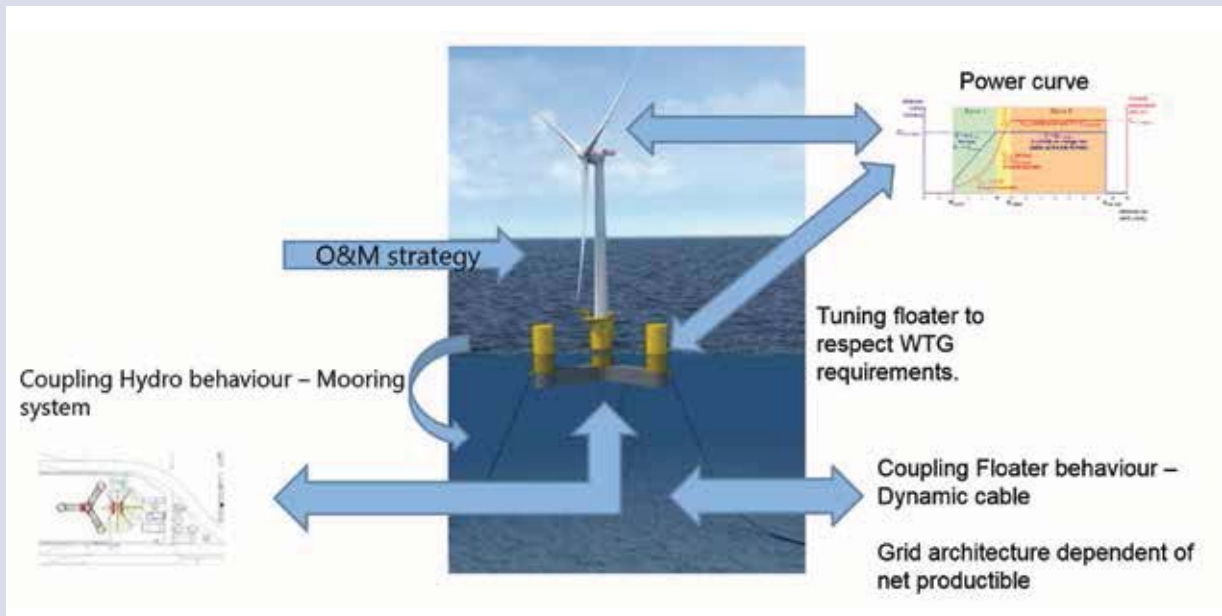


Figure 6 : Optimisation d'une éolienne flottante - Crédit : Naval Energies.

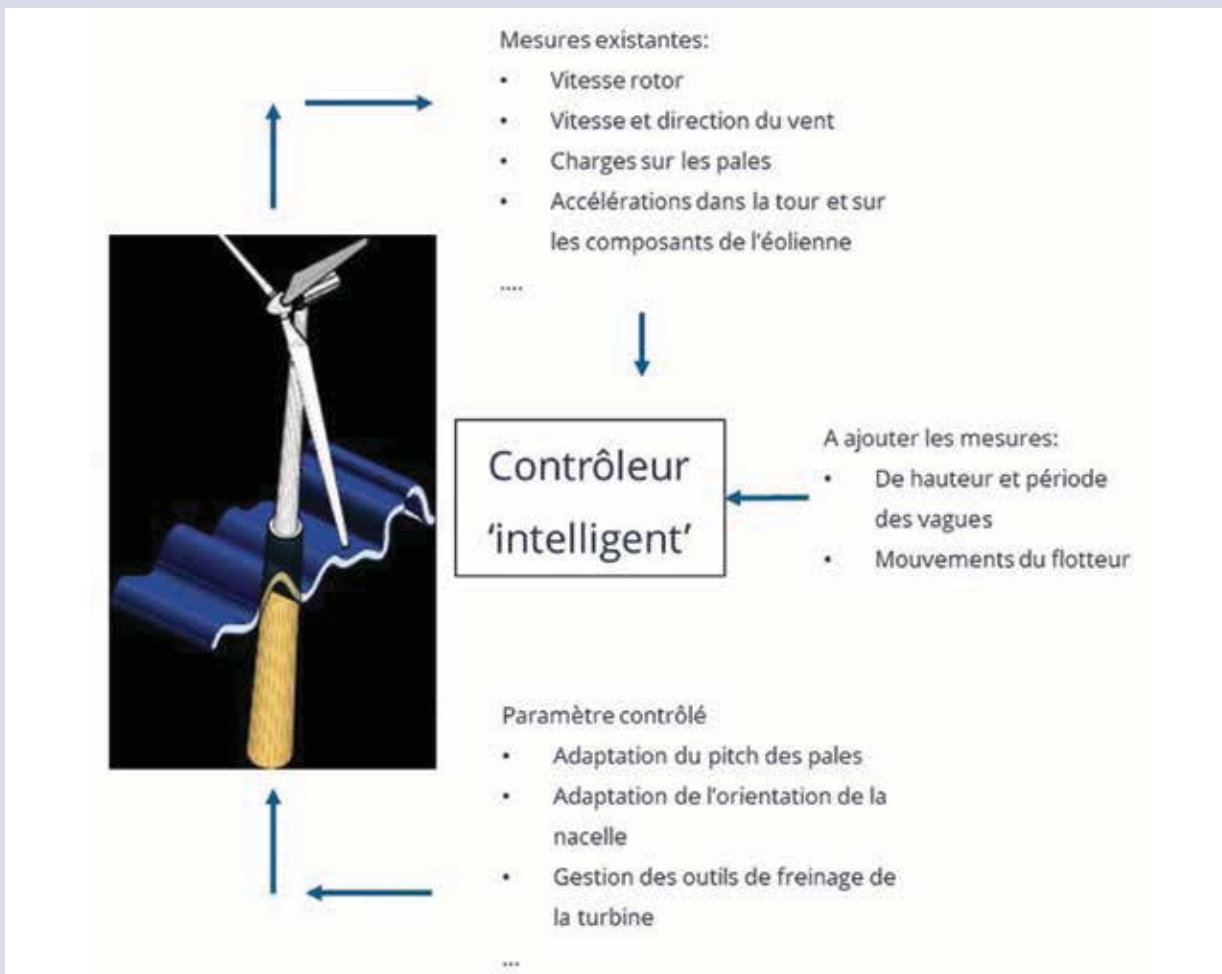


Figure 7 : Schéma descriptif d'un contrôleur intelligent – Crédit : Eolfi.

qu'ils puissent prendre en compte dans leur algorithme de calcul les mouvements du flotteur. Un contrôleur dit « intelligent » devrait ajouter à sa boucle de contrôle liée aux variations du vent en direction et en vitesse, une boucle complémentaire liée aux mouvements du flotteur. Une des difficultés dans la création d'un tel contrôleur est de réussir à distinguer les variations dues au vent de celles dues aux mouvements du flotteur. Un tel contrôleur permettra :

- d'optimiser la stabilité du flotteur et donc de limiter les mouvements de l'éolienne ;
- d'optimiser le productible ;
- de réduire les charges sur l'éolienne, le flotteur et les ancrages.

Le câble dynamique

Un des challenges de l'éolien flottant vis-à-vis de l'éolien posé est clairement la mise au point de la liaison électrique avec les éoliennes flottantes et avec la sous-station électrique flottante.

Les câbles électriques doivent désormais comporter des tronçons dits dynamiques, qui relient les éoliennes ou les sous-stations flottantes se déplaçant autour de leur position d'équilibre au gré des états de la mer et du vent, dans le fond de la mer où les câbles une fois posés sont dits statiques. Comment réaliser un système de liaison électrique qui réponde à ces déplacements et aux efforts associés ? Quels sont les enjeux pour les câbles électriques eux-mêmes ?

Des systèmes de câbles dynamiques ont déjà été développés pour des applications dans l'Oil & Gas offshore et l'éolien flottant profite de ces développements. Pour suivre

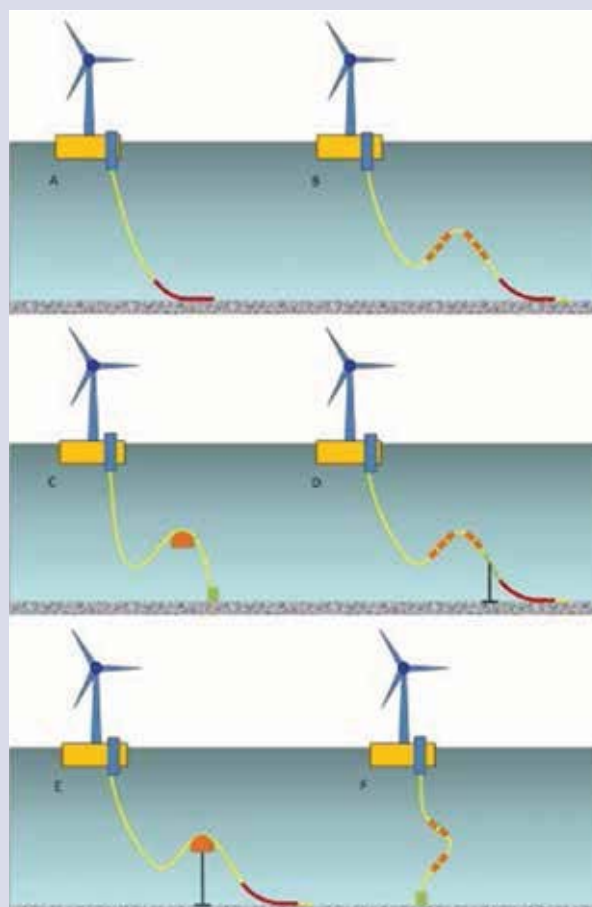


Figure 8 : Diverses configurations d'un câble électrique dynamique inter-éoliennes - Crédit : CIGRE TB 610.

les mouvements du flotteur sans mettre le câble en tension, le principe généralement utilisé est celui du câble en accordéon. Le système complet de câble dynamique com-

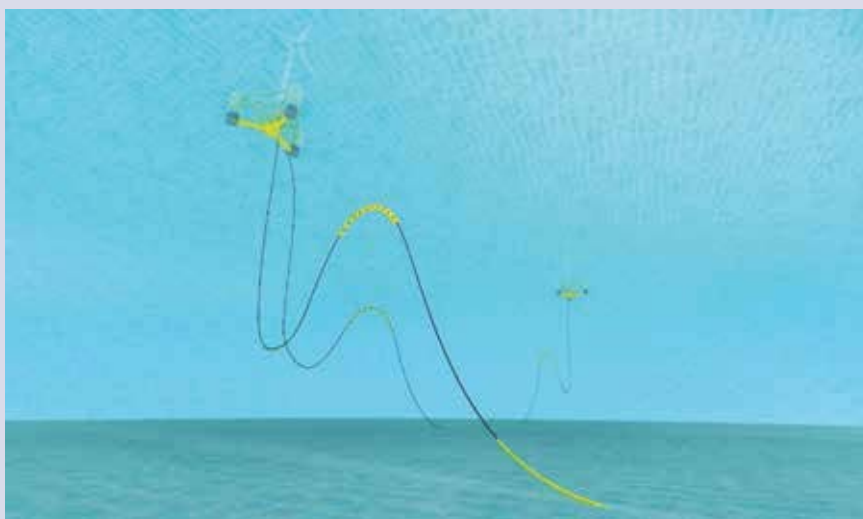


Figure 9 : Vue en perspective sous-marine d'un câble électrique dynamique – Crédit : Bardot group.

porte divers accessoires destinés à réaliser cette forme en accordéon élastique, capable de se déplier et se replier, tout en protégeant le câble de la friction, de la compression et de la flexion dépassant les limites mécaniques du câble (rayon minimal de flexion).

Parmi ces accessoires figurent :

- les raidisseurs (*bend stiffner*) : utilisés aux endroits où le câble est en interface avec un point rigide comme la sortie du tube du flotteur, ou bien des lieux d'ancrage du câble au sol ;
- les bouées : utilisées pour réaliser les points hauts des lacets de l'accordéon ;
- des poids ou des ancrages : utilisés pour stabiliser le système, réduire les mouvements, ou faire des forces de rappel après l'extension de l'accordéon ;
- des gaines de protection au niveau des zones de friction.

Tout l'enjeu est de concevoir un système de câble dynamique répondant :

- aux excursions latérales et verticales du flotteur ;
- aux sollicitations du courant et de la pression hydrodynamique qui se retrouve accentuée avec la flore sous-marine qui se fixe sur le câble ;
- au poids propre immergé du système.

Tout ceci sans dépasser les limites élastiques et les limites en fatigue du câble et de ses accessoires, avec un coût minimal de fourniture et d'installation.

Minimiser le coût de revient du kWh étant un gage de réussite du développement de la filière de l'éolien en mer, cet objectif est omniprésent dans la conception des systèmes câbles dynamiques au nombre de deux en

moyenne par éolienne flottante. A l'échelle d'une ferme éolienne de 500 MW équipée d'éoliennes de puissance unitaire de 8 MW, ceci conduit à environ 125 systèmes de câbles dynamique.

La contrainte économique n'est pas le seul point qui diffère le cas de l'éolien flottant de celui des câbles dynamiques dans l'Oil & Gas, il y a aussi les mouvements des flotteurs, les profondeurs, les niveaux de tension et de puissance supérieurs.

Sur l'ensemble du système « éolienne + flotteur », la poussée de l'éolienne en production a un impact significatif sur les excursions latérales et les accélérations. Sauf à utiliser des flotteurs surdimensionnés non viables économiquement, ou bien des ancrages pré-tendus, les excursions latérales des flotteurs sont importantes. Lorsque la profondeur ne dépasse guère les 100 m, concevoir un système de câble dynamique dans la hauteur de la colonne d'eau qui réponde aux excursions du flotteur tout en restant à une distance suffisante de la surface et du fond est un challenge en soi. D'un point de vue dynamique, la réponse du flotteur à la houle est aussi importante, car elle détermine les accélérations périodiques auxquelles le câble va être soumis et donc sa fatigue mécanique qui est l'un des points clés du développement des câbles dynamiques pour l'éolien flottant. Développer des écrans métalliques qui résistent à la fatigue mécanique et garantissent une étanchéité parfaite de l'isolant électrique est l'un des enjeux auquel les industriels vont devoir répondre pour permettre à l'éolien flottant d'exporter l'énergie électrique vers la côte à des tensions supérieures à 100 kV.