



# L'ÉOLIEN *OFFSHORE* FLOTTANT DANS SA DIMENSION INDUSTRIELLE ET TECHNOLOGIQUE

Michel CRUCIANI

Juillet 2019



L'Ifri est, en France, le principal centre indépendant de recherche, d'information et de débat sur les grandes questions internationales. Créé en 1979 par Thierry de Montbrial, l'Ifri est une association reconnue d'utilité publique (loi de 1901). Il n'est soumis à aucune tutelle administrative, définit librement ses activités et publie régulièrement ses travaux.

L'Ifri associe, au travers de ses études et de ses débats, dans une démarche interdisciplinaire, décideurs politiques et experts à l'échelle internationale.

Les opinions exprimées dans ce texte n'engagent que la responsabilité de l'auteur.

ISBN : 979-10-373-0047-8

© Tous droits réservés, Ifri, 2019

Couverture : L'éolienne flottante Floatgen, équipée du flotteur Ideol, installée sur le site SEM-REV (Centrale Nantes) au large du Croisic. © Ideol/V. Joncheray

**Comment citer cette publication :**

Michel Cruciani, « L'éolien *offshore* flottant dans sa dimension industrielle et technologique », *Études de l'Ifri*, Ifri, juillet 2019.

**Ifri**

27 rue de la Procession 75740 Paris Cedex 15 – FRANCE

Tél. : +33 (0)1 40 61 60 00 – Fax : +33 (0)1 40 61 60 60

E-mail : [accueil@ifri.org](mailto:accueil@ifri.org)

**Site internet :** [ifri.org](http://ifri.org)



# Remerciements

Les pages qui suivent n'auraient pas pu être écrites sans les apports des nombreux experts qui ont bien voulu répondre à mes questions, dans leurs bureaux à Paris ou au Corum de Montpellier, lors des journées de l'évènement mondial FOWT-2019, ayant rassemblé 800 professionnels venus de 28 pays entre le 24 et le 26 avril. Je les en remercie tous ici chaleureusement et je remercie vivement l'Ifri de m'avoir permis d'assister à cette conférence de premier plan. J'exprime également ma grande reconnaissance à Brigitte Bornemann (Énergies de la Mer) pour tout le temps qu'elle m'a consacré.



## Auteur

**Michel Cruciani** est chargé de mission au Centre de géopolitique de l'énergie et des matières premières (CGEMP) de l'Université Paris-Dauphine depuis février 2007. Il contribue notamment à certaines études, participe à l'organisation des conférences, apporte son concours aux publications et assure une grande partie de l'enseignement sur les énergies renouvelables, destiné aux étudiants en master.

Auparavant, Michel Cruciani, titulaire d'un diplôme d'ingénieur, a partagé ses activités entre Gaz de France (Services Techniques, puis Études économiques), la CFDT (Administrateur de Gaz de France, puis Secrétaire général adjoint de la fédération du gaz et de l'électricité), et enfin Électricité de France (Direction des Affaires européennes).

Dans ces fonctions, il a suivi la libéralisation des marchés du gaz et de l'électricité aux États-Unis et en Europe ainsi que la montée des préoccupations environnementales, conduisant à l'adoption de politiques climatiques, à un nouveau regard sur l'énergie nucléaire et à la promotion des énergies renouvelables.

Michel Cruciani est associé aux travaux du Centre Énergie de l'Ifri depuis 2009.





# Résumé

L'éolien *offshore* sur fondation fait déjà partie des sources d'énergie renouvelable matures, affichant des performances techniques et économiques remarquables. L'Union européenne (UE) constitue son premier pôle mondial de développement, avec 18,3 gigawatts (GW) installés à fin 2018 (dont plus de la moitié au Royaume-Uni), mais d'autres pays ont aussi mis en service des capacités significatives (environ 4,6 GW en Chine) ou préparent le lancement de parcs importants (côte est des États-Unis). Cependant, les éoliennes sur fondation ne peuvent être installées que sur un plancher océanique de faible profondeur, tel que celui de la partie méridionale de la mer du Nord, une caractéristique peu fréquente.

La technologie éolienne *offshore* flottante s'affranchit de cette contrainte. Plusieurs pays européens<sup>1</sup> ont encouragé sa mise au point, en testant divers modèles de flotteurs, d'abord avec des prototypes, puis des démonstrateurs de taille industrielle, et aujourd'hui des fermes au stade pré-commercial atteignant chacune une capacité de plusieurs dizaines de mégawatts (MW). Chaque étape antérieure a permis de valider des réponses techniques aux redoutables difficultés à affronter, notamment pour assurer la plus grande stabilité possible à la turbine malgré la houle, afin de réduire l'amplitude des vibrations, un phénomène destructeur pour les composants. Cinq modèles de flotteur ont franchi cette épreuve et se retrouvent aujourd'hui dans les divers projets au stade pré-commercial ; ces derniers visent à engranger de nouveaux progrès concernant l'ancrage et le raccordement électrique.

Les installations flottantes parvenues au stade pré-commercial utilisent des turbines classiques, celles qui équipent les éoliennes *offshore* sur fondation, et des flotteurs conçus par des entreprises détenant une longue expérience dans l'industrie pétrolière ou la construction navale. En parallèle, des modèles novateurs de flotteurs et turbines sont en cours d'essai et pourraient percer ultérieurement. Tous les projets bénéficient d'une aide financière, sous forme de subventions, prêts avantageux et achat à prix bonifié de l'électricité produite, car il s'agit de petites séries (trois à cinq machines), dont la nouveauté implique des primes de risque de la part des apporteurs de capitaux ainsi que des compagnies d'assurance.

---

1. France, Norvège, Portugal et Royaume-Uni (Écosse).

Les éoliennes flottantes présentent un atout majeur : on les assemble au port et on les achemine ensuite sur site avec un remorqueur ordinaire, qui peut aussi les ramener à terre pour la maintenance lourde ou le démantèlement final. Cette spécificité nourrit la conviction que la filière deviendra compétitive lorsqu'elle bénéficiera des effets d'échelle engendrés par le lancement de séries longues et des effets d'apprentissage réduisant les coûts d'exploitation. Toutefois, les États européens qui ont soutenu le lancement de cette technologie jusqu'à nos jours hésitent à poursuivre leur effort à une plus grande échelle, dans une période de rigueur budgétaire et de compétition internationale aiguë, qui incite à contenir le prix de l'énergie.

L'Europe a acquis une avance sensible dans la maîtrise de l'éolien flottant, car elle détient un ensemble de compétences particulièrement précieuses dans ce domaine ; par ailleurs, l'éolien flottant reprend de multiples composants mis au point pour l'industrie pétro-gazière *offshore* et dont les chaînes de valeur sont en partie européennes. Elle pourrait néanmoins se voir rattrapée ou dépassée par des pays concurrents qui ont perçu le potentiel de cette filière et veulent participer à son déploiement. Nos entreprises pionnières nouent tout naturellement des partenariats dans ces pays, étant soucieuses de valoriser rapidement leurs acquis et manquant de visibilité sur les débouchés en Europe.

L'examen du dossier laisse penser que la filière possède de fortes chances de prendre une place importante dans la transition énergétique à venir. Aucun État européen ne pouvant assumer seul les charges qu'implique le développement de cette technologie, il semblerait judicieux de mettre en place une « alliance européenne de l'éolien *offshore* flottant » propre à accélérer sa mise au point et à conforter la place occupée par l'industrie de notre territoire dans sa diffusion.

# Sommaire

<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>11</b>
<b>CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES ET DIFFICULTÉS À SURMONTER</b> .....	<b>13</b>
L'objectif de stabilité .....	13
L'ancrage .....	14
L'évacuation du courant produit .....	15
Les premiers pas .....	17
<b>RÉALISATIONS ET PROJETS</b> .....	<b>23</b>
Le stade pré-commercial .....	23
Les options retenues .....	24
Aspects économiques .....	26
Impact environnemental et acceptabilité sociale .....	30
<b>SUGGESTIONS RELATIVES AUX POLITIQUES PUBLIQUES ET AUX STRATÉGIES INDUSTRIELLES</b> .....	<b>33</b>
Les atouts de l'Europe .....	33
Considérations relatives au cadre européen .....	35
Considérations relatives aux politiques nationales .....	36
Considérations industrielles .....	38
<b>CONCLUSION</b> .....	<b>41</b>



# Introduction

Plusieurs pays dans le monde ont engagé très tôt une transition énergétique accordant une place majeure aux sources renouvelables d'énergie. Compte tenu des limites naturelles que présentent les bioénergies ou la géothermie, l'électricité d'origine renouvelable est apparue comme la voie privilégiée ; grâce aux progrès techniques et à la baisse des coûts, deux nouveaux modes de production, éolien et photovoltaïque, ont rapidement acquis des parts significatives dans les bilans énergétiques.

La poursuite de cette orientation, voire la recherche d'un mix électrique exclusivement renouvelable, a poussé les États européens dotés d'une zone maritime à en exploiter le potentiel. Dans une précédente étude<sup>2</sup>, nous avons mis en évidence le rôle pionnier de l'Europe dans la filière éolienne *offshore*. Fin 2018, les pays de l'UE et la Norvège représentaient 79 % de la capacité éolienne installée en mer dans le monde, avec une puissance raccordée de 18,3 GW. Leur seule rivale reste la Chine, avec 20 % de la capacité mondiale (4,6 GW). États-Unis, Corée du Sud et Japon réunis n'atteignent ensemble que 1 % du parc total (0,27 GW)<sup>3</sup>.

L'étude soulignait que cette performance reposait sur une singularité locale, l'existence d'une zone peu profonde et bien ventée dans la moitié méridionale de la mer du Nord, avec des ramifications en mer d'Irlande et mer Baltique. De ce fait, les opérateurs ont pu transposer en mer une technologie bien maîtrisée à terre, les éoliennes sur fondation, que l'on peut implanter sur des fonds marins jusqu'à une hauteur d'eau d'environ 60 m. Une telle configuration maritime se retrouve dans quelques régions du monde (dont la mer de Chine méridionale et la côte est des États-Unis), mais finalement peu nombreuses. Sur l'ensemble de la planète, la plupart des zones côtières bien ventées sont baignées par des eaux trop profondes pour pouvoir y installer des éoliennes sur fondation. En revanche, on pourrait les équiper d'éoliennes *offshore* flottantes, une technologie naissante. Les débouchés pour cette technologie paraissent immenses, avec

---

2. M. Cruciani, « L'essor de l'éolien *offshore* en mer du Nord : un enjeu stratégique pour l'Europe », *Études de l'Ifri*, Ifri, juillet 2018, disponible sur : [www.ifri.org](http://www.ifri.org).

3. Global Wind Energy Council, *Global Wind Report 2018*, avril 2019, p. 26 et 29.

un potentiel technique très élevé pour l'Europe et pour la côte ouest des États-Unis notamment, et un marché accessible de 100 GW d'ici 2050<sup>4</sup>.

La présente note se penche sur cette nouvelle filière. Un premier chapitre passe succinctement en revue les caractéristiques techniques et les difficultés particulières auxquelles elle fait face. Un second chapitre décrit les principaux projets déjà menés ou en cours de lancement et évoque les options qui s'offrent aux acteurs, industriels ou pouvoirs publics. La description fait apparaître l'avance remarquable que détient l'Europe dans la technologie de l'éolien *offshore* flottant, puisqu'elle abrite six projets au stade pré-commercial (un autre se situe au Japon et le dernier aux États-Unis<sup>5</sup>). Ces projets constituent une étape clé pour engager la phase de réduction des coûts qui mènera à une offre compétitive à grande échelle. En conséquence, un dernier chapitre est dédié aux politiques publiques et aux stratégies industrielles qui seraient de nature à conforter cette avance et à placer les acteurs européens de la filière en position avantageuse sur un marché mondial offrant de très belles perspectives.

---

4. R. Proskovics, « Floating *Offshore* Wind: A Situational Analysis », ORE Catapult, octobre 2018, p. 17, disponible sur: <https://s3-eu-west-1.amazonaws.com>.

5. Carbon Trust, *Floating Wind Joint Industry Project – Phase I Summary Report*, 2018, p. 16.

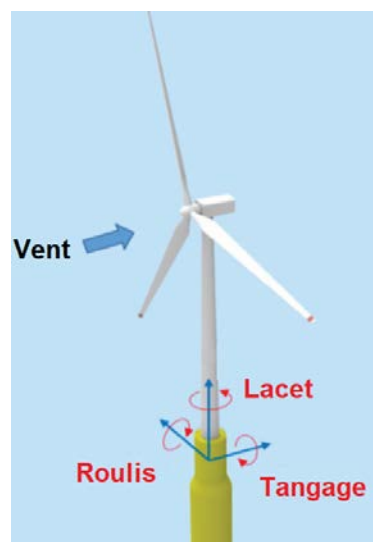
# Caractéristiques techniques et difficultés à surmonter

## L'objectif de stabilité

L'objectif premier de tout concepteur d'équipement *offshore* flottant consiste à procurer la plus grande stabilité possible à son produit. Lorsqu'une plateforme flottante subit des oscillations au gré de la houle, elle exerce une traction suivie d'un relâchement sur les dispositifs d'ancrage et sur les composants qui le relient à la terre ferme (tuyaux ou câbles électriques). Une telle alternance provoque une « fatigue » des matériaux, qui se dégradent beaucoup plus rapidement qu'en supportant un effort constant (traction ou compression permanente).

La fatigue est accrue dans le cas des éoliennes flottantes en raison des vibrations liées à la rotation des pales. Ces vibrations se produisent dès que l'axe de rotation sort d'un alignement rigoureux avec la direction du vent ; on les observe sur toutes les éoliennes, y compris à terre lors de vents turbulents. Dans le cas d'une éolienne flottante, aux fluctuations du vent s'ajoutent les éventuels mouvements du flotteur, qui peuvent entraîner un pivotement autour de l'axe vertical (lacet), un balancement d'avant en arrière (roulis) ou de bâbord sur tribord (tangage).

Figure 1 : Les trois axes de mouvement

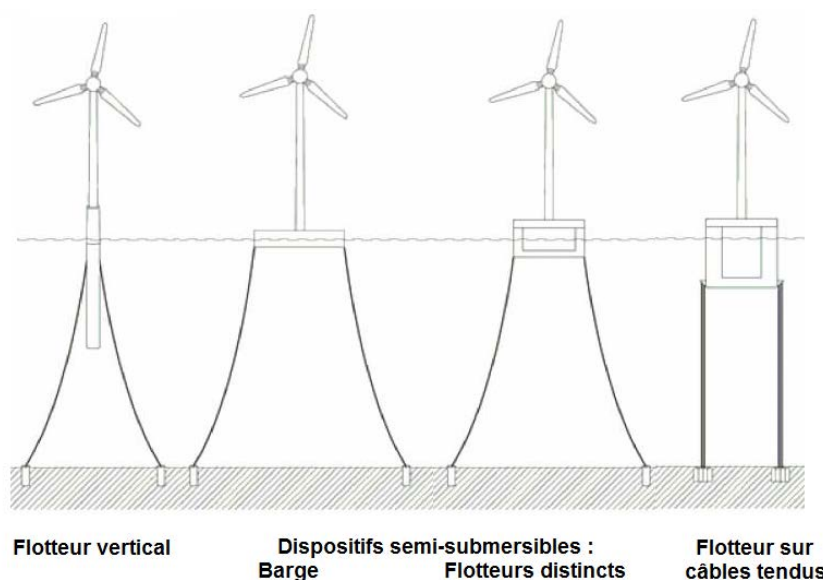


Par ailleurs, la rotation d'une turbine paraît régulière, mais elle ne l'est pas parfaitement : au moment où une pale passe au droit du mat, la pression du vent se trouve altérée, modifiant ponctuellement l'équilibre des forces. La répétition de cette altération induit aussi une vibration dans le support. Les oscillations de l'ensemble peuvent gagner en amplitude si le mouvement suscité par la houle se conjugue à celui créé par la rotation pour engendrer un phénomène de résonance mécanique<sup>6</sup>. Le risque de résonance existe pour les éoliennes *offshore* sur fondation soumises au choc régulier des vagues, mais l'enracinement dans le sol assure une diffusion de l'énergie et limite l'amplitude des oscillations. En outre, les installations flottantes sont souvent destinées à être implantées dans des zones exposées à une houle et des vents plus forts que les éoliennes sur fondation.

## L'ancrage

La principale qualité requise d'un flotteur concerne donc la stabilité qu'il confère à l'installation, afin d'en réduire les oscillations et, ce faisant, minimiser la fatigue des matériaux. Deux facteurs importants concourent à améliorer la stabilité : l'abaissement du centre de gravité et l'ancrage de l'ensemble. De ce fait, un flotteur se conçoit d'emblée avec son système d'ancrage.

**Figure 2 : Quatre exemples de flotteurs avec leurs ancres**



Source : Figure librement inspirée de l'image figurant sur la publication DNV-GL, « Floating wind turbine structures DNVGL-ST-0119 », juillet 2018, p. 17.

6. On peut se représenter intuitivement ce phénomène en se souvenant que si l'on pousse une balançoire au moment où le siège est au plus haut, on augmente progressivement l'amplitude du balancement sans avoir à exercer une pression plus forte à chaque poussée.



L'ancrage le plus simple consiste en plusieurs chaînes qui se terminent soit par une ancre marine ou un solide très lourd posé au sol, dont le poids freine les mouvements du flotteur, soit par un scellement sur le fond marin, technologie la plus sûre pour éviter les glissements. Le scellement se fait souvent au moyen d'une ancre à succion, sorte de cylindre creux qui s'enfonce verticalement dans le plancher océanique. Chaque chaîne est le plus souvent reliée au flotteur par un câble en métal ou en fibres synthétiques. On peut ancrer directement les câbles sur le sol, mais il faut augmenter dans ce cas le nombre de câbles et de scellements. Certains flotteurs sont conçus pour des câbles tendus à la verticale ; cette technique procure une excellente stabilité mais elle suppose un point d'arrimage très robuste sur le plancher marin, d'une confection plus complexe et plus coûteuse que les autres dispositifs, et elle rend délicate une déconnexion ultérieure pour les besoins de maintenance lourde.

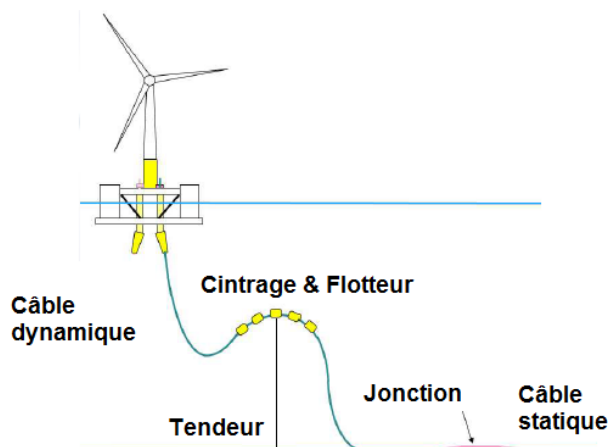
Quelle que soit la solution, on choisit des matériaux présentant une résistance élevée à la fatigue et à la corrosion, cette dernière provenant à la fois du milieu salin et de la colonisation rapide des composants immergés par la faune et la flore océaniques.

## L'évacuation du courant produit

Dans le cas des éoliennes sur fondation, on évacue le courant électrique au moyen d'un câble reliant chaque éolienne à une sous-station, sous une tension de 33 ou 66 kilovolts (kV), selon la puissance des turbines. Depuis la sous-station, un câble de plus forte tension (typiquement 150 kV) rejoint la terre ferme. Tous ces câbles sont statiques et adaptés à un courant alternatif.

Dans le cas d'une éolienne flottante, les oscillations de l'installation se répercutent dans les câbles, qui subissent un mouvement permanent : on parle maintenant de « câbles dynamiques ». L'expérience des installations *offshore* flottantes dans l'industrie pétrolière enseigne que les plus fortes contraintes se manifestent à la tête du câble, c'est-à-dire au point de connexion avec la partie fixée sur le flotteur. Pour réduire ces contraintes, et donc la fatigue de cette partie du câble, il faut donner une forme de « s » au tronçon situé juste avant la connexion, grâce à un dispositif de cintrage avec flotteurs et tendeur, une technologie parfaitement maîtrisée dans l'*offshore* pétrolier.

Figure 3 : Principe du raccordement électrique



Source : Figure librement inspirée de l'image figurant sur la présentation de E. Laure, « O&M and design challenges of floating wind farm power cables », RTE, congrès FOWT-2019, 25 avril 2019.

Dans l'état actuel des techniques, on sait réaliser des câbles dynamiques jusqu'à une tension de 66 kV ; on peut donc acheminer le courant à partir d'une éolienne flottante. En revanche, les câbles de plus haut voltage utilisent des isolants et des revêtements extérieurs d'une composition différente, qui tolère mal la fatigue. La conception d'une sous-station flottante suppose donc de surmonter des difficultés sérieuses si on veut la doter d'un câble dynamique de 150 kV en courant alternatif, par exemple, allant jusqu'au rivage. Les perspectives restent encourageantes à moyen terme, car un câble dynamique de 115 kV a été testé avec succès depuis 2010 par le groupe ABB pour alimenter en courant alternatif la plateforme flottante de Gjoa, exploitée par Equinor (ex-Statoil), destinée à l'extraction de pétrole et gaz dans la partie septentrionale de la mer du Nord. Le groupe ABB a franchi une nouvelle étape en 2013, avec la mise au point d'un câble dynamique de 123 kV desservant la plateforme flottante Goliat, exploitée conjointement par ENI et Equinor en mer de Barents, à nouveau pour le gaz et le pétrole<sup>7</sup>. Enfin, les entreprises françaises Ideol et Atlantique *Offshore Energy* (filiale du groupe Chantiers de l'Atlantique) ont dévoilé le 4 juin 2019 un projet complet de sous-station flottante, conçue en coopération avec ABB, qui marque une nouvelle avancée<sup>8</sup>.

Notons qu'il serait aussi possible de convertir le courant alternatif en courant continu, dont la technologie se prête mieux aux câbles dynamiques. Dans une vision de long terme, on pourrait imaginer que la

7. ABB, « World's longest, most powerful dynamic AC cable: Goliat floating oil and gas platform, Barents Sea », *Press Release*, 2013, disponible sur : <https://library.e.abb.com>.

8. Ideol, « Ideol et Atlantique *Offshore Energy* lancent la commercialisation de la première sous-station électrique *offshore* flottante au monde », *Communiqué de presse*, 4 juin 2019, disponible sur : [www.ideol-offshore.com](http://www.ideol-offshore.com).

sous-station convertisse l'électricité en hydrogène, dont l'évacuation se ferait par navire, autorisant une implantation des éoliennes flottantes très loin du rivage.

La partie des câbles qui repose sur le fond marin est toujours protégée, soit par un ensouillage dans les sédiments, soit par un enrochement, soit encore par une couverture constituée de pièces en béton ou en fonte. Certains projets prévoient que l'on puisse déconnecter le tronçon posé au sol de celui qui descend de l'éolienne ou de la sous-station. Cette jonction manœuvrable jouerait ainsi le rôle de la prise de courant d'un appareil ménager, qui se débranche au besoin. La possibilité de connecter ou déconnecter les installations induit un surcoût, mais elle offre plusieurs avantages : elle permet de programmer la pose des câbles sur le fond marin avant l'arrivée des machines, de déconnecter celles-ci pour les ramener à terre à des fins de maintenance et enfin d'éviter un arrachement des câbles dans le cas où une éolienne aurait rompu son ancrage et commencerait à dériver.

## Les premiers pas

Attirés par la perspective d'un marché considérable et poussés par des gouvernements soucieux de promouvoir une source nouvelle d'énergie propre, plusieurs acteurs industriels étudient depuis plus d'une décennie la filière éolienne *offshore* flottante selon un processus en plusieurs étapes. Au terme d'une phase préliminaire sur ordinateur, lorsque les études se révèlent engageantes, on passe à la réalisation d'un prototype à échelle réduite, puis à la construction d'un démonstrateur de taille industrielle et ensuite à la mise en service d'une installation pré-commerciale. Le succès de chaque étape conditionne bien sûr le passage à la suivante. Il existe dans le monde des projets se situant à chacune des quatre étapes ci-dessus résumées ; aucun n'a atteint l'étape ultime, qui consisterait à concourir dans des conditions de marché.

Le stade du démonstrateur a suivi la chronologie ci-dessous<sup>9</sup> :

- 2009 : La première installation de taille industrielle a été lancée au large de Karmøy (Norvège) par le groupe Statoil (aujourd'hui Equinor). Dénommée Hywind Demo, elle comportait un flotteur vertical et une turbine de 2,3 MW fournie par Siemens, non spécifiquement conçue pour cet usage.

---

9. Statoil, « Hywind - Floating *Offshore* Wind 2017 », 20 janvier 2017 ; Energias de Portugal, « The WindFloat Project », Conference Atlantic Forum, 30 octobre 2012; Japan Wind Power Association, « *Offshore* Wind Power Development in Japan », 28 février 2018 ; Floatgen, Communiqués de presse enregistrés le 9 mai 2019 sur le site Internet du projet Floatgen, disponibles sur : <https://floatgen.eu>.

- 2011 : Le groupe portugais EPD Renováveis (EDPR), associé à l'opérateur pétrolier et gazier espagnol Repsol, a ensuite mis en service à Aguçadoura, sur la côte portugaise, le modèle WindFloat, doté d'un flotteur semi-submersible conçu par le groupe américain Principle Power Inc. et d'une turbine Vestas de 2 MW, provenant également de la gamme ordinaire.
- 2016-2018 : Le Japon a pris le relais, avec quatre démonstrateurs de modèles différents, installés l'un à Goto-Kabashima (2 MW), deux à Fukushima (5 MW), tous équipés de turbines Hitachi, et un dernier à Kitakyushu (2 MW), mettant en œuvre une barge semi-submersible de conception Ideol avec une turbine à deux pales.
- 2018 : La France a raccordé au réseau en 2018, d'une part, l'éolienne Floatgen, au large du Croisic, munie d'une turbine de 2 MW livrée par Vestas montée sur une barge semi-submersible avec coque en béton conçue par Ideol et construite par le groupe Bouygues et, d'autre part, le modèle innovant Eolink (voir encadré).

On note que les trois pionniers européens ont formé des consortiums dans lesquels au moins un acteur détient une expérience dans l'exploration et la production d'hydrocarbures en mer (Equinor, Repsol et Ideol). En effet, les structures industrielles flottantes de grande taille existent depuis longtemps dans l'*offshore* pétrolier et gazier. Elles servent souvent de support à des installations de chargement ou déchargement en mer, à proximité des plateformes de forage ou des ports. En fonction des besoins, divers types de flotteurs ont été mis au point, combinés à divers types d'ancrage pour éviter que l'installation dérive au gré des courants. Ces modèles ont fait leurs preuves en résistant à l'assaut permanent des vagues, y compris parfois des vagues de tempêtes, voire des vagues de typhons ou même des « vagues scélérates » d'une hauteur énorme.

Leur démarche a attiré d'autres prestataires des industries pétrolière et gazière, qui ont conçu à leur tour des modèles bientôt en phase de démonstration. On en citera ici deux exemples, venant d'industriels convaincus que le marché de l'éolien flottant va se développer rapidement et qu'il convient de standardiser les composants pour une production en masse peu onéreuse. Il s'agit dans les deux cas de flotteurs modulaires relativement faciles à assembler :

- Le groupe Shell, associé à l'opérateur allemand Innogy, devrait tester en 2020 le modèle Tetraspar, conçu par l'opérateur Stiesdal, également allemand, au large de la Norvège, avec une turbine Siemens-Gamesa de 3,6 MW.

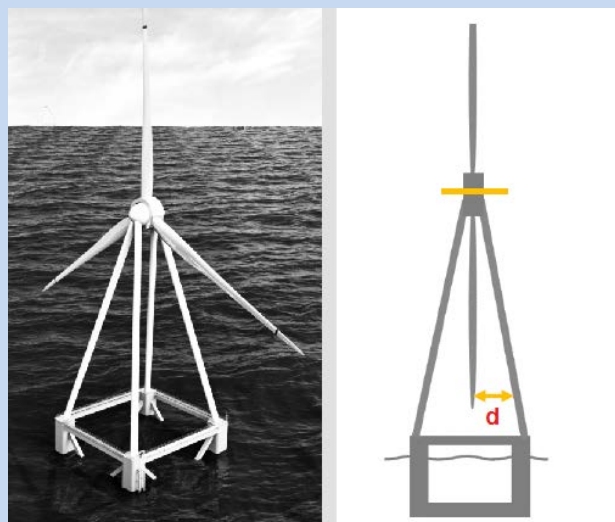
- Le groupe italien SAIPEM prévoit la mise en service de son modèle Hexafloat en 2022 sur la côte occidentale de l'Irlande. Le constructeur indique que son flotteur sera livré en kit et qu'il pourra recevoir toute turbine conventionnelle jusqu'à 15 MW.

Tous les acteurs mentionnés ci-dessus ont transféré une compétence longuement éprouvée vers un nouveau secteur d'activité. Ils minimisent ainsi les risques, mais ce choix comporte un revers : il conduit à ignorer les projets les plus innovants, portés par des nouveaux venus (voir encadré). La difficulté à percer de ces derniers provient de travaux de recherche menés dans des petites structures, laboratoires ou universités sans liens suffisants avec les grandes entreprises, rencontrant en conséquence des obstacles pour lever des capitaux.

## Encadré 1 : Les projets innovants

Plus d'une trentaine de modèles d'éoliennes flottantes ont fait l'objet d'études et plusieurs ont franchi l'étape du prototype. On peut citer deux réalisations au stade du démonstrateur : le projet Eolink, en cours de test au large de Saint-Anne-du-Portzic (France) depuis 2018 et le projet X1Wind, dont la phase d'essais débutera en 2020 aux îles Canaries (Espagne). Il s'agit de deux modèles très novateurs, qui exploitent des turbines conçues exclusivement pour des embases flottantes, avec des supports en poutrelles métalliques, beaucoup plus légers que les mâts ordinaires, épousant les arêtes d'une pyramide (Eolink) ou d'un tétraèdre (X1Wind). Maintenus sur site par un seul point d'ancrage, elles s'orientent spontanément face au vent, ce qui réduit en corollaire le coût des dispositifs de contrôle-commande et améliore le facteur de charge. En outre, le modèle Eolink offre une grande distance entre l'extrémité des pales et les quatre supports (distance repérée « d » sur la figure 4) ; le risque de choc étant moindre, on peut choisir des matériaux plus légers pour ces pales ; étant moins lourdes, leur rotation engendre moins de fatigue dans la structure. Eolink et X1Wind devront maintenant prouver la fiabilité du raccordement électrique, soumis à des degrés de liberté plus élevés que sur les installations munies de plusieurs points d'ancrage.

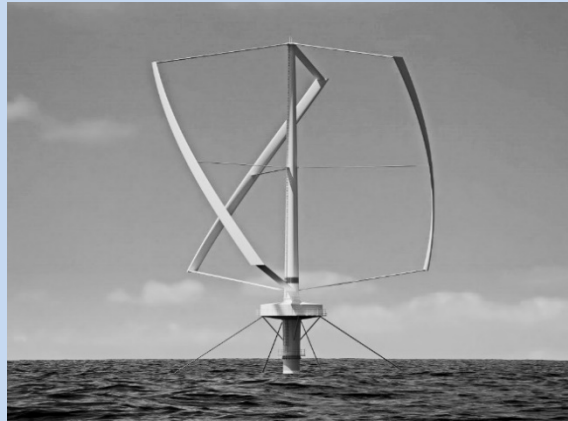
Figure 4 : Les spécificités du modèle Eolink



Source : M. Guyot, « How floating wind will enable 40 €/MWh? », Eolink, congrès FOWT-2019, 25 avril 2019.

Le projet SeaTwirl constitue une rupture encore plus grande avec les concepts en vigueur à ce jour, puisqu'il met en œuvre une turbine à axe vertical, selon le principe étudié au siècle dernier par l'ingénieur Georges Darrieus. En plaçant le rotor très près du niveau de la mer, ce modèle abaisse notablement le centre de gravité de l'installation. De ce fait, un flotteur de faibles proportions suffit pour en garantir la stabilité, or le flotteur représente une fraction élevée du coût d'une éolienne flottante (jusqu'à 40 % dans certains cas<sup>10</sup>). La position en partie basse du rotor facilite par ailleurs les opérations de maintenance. Derniers avantages, les éoliennes Darrieus s'accommodent de vents tournants et paraissent peu sensibles à l'effet de sillage, ce qui autorise leurs implantations à faible distance les unes des autres et diminue l'emprise sur le domaine maritime. Cette conception limite aussi l'impact du roulis et du tangage. Le projet SeaTwirl a recueilli le soutien financier du groupe norvégien NorSea, spécialiste de la logistique *offshore*, et du groupe belge Colruyt, dont la filiale Parkwind exploite d'importants parcs éoliens *offshore* sur fondation en mer du Nord. SeaTwirl prévoit la mise en service en 2020 d'un démonstrateur de 1 MW sur les côtes norvégiennes.

10. ECN, *Cost Modelling of Floating Wind Farms*, mars 2016, p. 28, disponible sur : <https://publicaties.ecn.nl>.

**Figure 5 : Le modèle SeaTwirl**

Source : SeaTwirl.

Enfin le groupe suédois Hexicon pilote la réalisation d'un démonstrateur de 10 MW reprenant un flotteur semi-submersible de forme triangulaire courant dans l'industrie pétrolière. Sur deux sommets du triangle on placera une éolienne de 5 MW ; pour rester toujours face au vent, l'ensemble pivotera autour du troisième sommet d'où partiront l'ancrage et le câble électrique. Le lancement est prévu début 2020 sur le site de Dounreay Tri, en Écosse.

**Figure 6 : Le modèle Hexicon**

Source : Hexicon, disponible sur : [www.hexicon.eu](http://www.hexicon.eu).





# Réalisations et projets

## Le stade pré-commercial

La validation des deux premiers démonstrateurs, Hywind et WindFloat, leur permet d'atteindre déjà le stade de la ferme, regroupant plusieurs machines identiques.

Le flotteur vertical Hywind conçu par Equinor a été retenu dans deux projets :

- *Hywind Scotland*, au large de Peterhead (Écosse), développé par Equinor (75 %) et le fonds Masdar (25 %), comprend cinq éoliennes sur flotteur vertical dotées chacune d'une turbine de 6 MW livrée par Siemens-Gamesa. Mis en service fin 2017, il affiche un taux de disponibilité proche de 95 %, révélateur de faibles temps d'interruptions pour maintenance, et un facteur de charge 57 %, confirmant le choix d'un emplacement bien venté. Equinor affirme que le coût de l'investissement au MW a chuté de 60 à 70 % par rapport à son précurseur Hywind Demo<sup>11</sup>.
- *Tampen* : Equinor envisage maintenant la réalisation d'un parc de 88 MW, toujours du modèle Hywind (11 éoliennes flottantes de 8 MW), sur le site de Tampen, afin d'alimenter en électricité les plateformes pétrolières de Gullfaks et Snorre, dans la zone norvégienne de la mer du Nord. Malgré un coût au MW en baisse d'un facteur 30 à 40 % par rapport au projet Hywind Scotland, le projet nécessite encore une subvention pour devenir rentable.

Les développeurs ont adopté la technologie WindFloat mise au point par Principle Power Inc. pour trois projets :

- *Windfloat Atlantic* (25 MW), situé au large de Viana do Castelo au Portugal, comportera trois turbines de 8,4 MW fournies par MHI-Vestas, sous l'égide du consortium WindPlus détenu à 79 % par EDPR ; la mise en service est prévue fin 2019. Ce projet a reçu une aide européenne dans le cadre du programme NER 300 et un prêt de la Banque européenne d'investissement (BEI).

---

11. N. Altermark, « Experience from Hywind Scotland and the way forward », Hywind Scotland, congrès FOWT-2019, 24 avril 2019.

- *Kincardine* (50 MW), au Sud-Est d'Aberdeen (Écosse), sera composé d'une turbine de 2 MW et de cinq turbines de 8 MW, toutes commandées à MHI-Vestas. Le groupe espagnol Cobra Wind International détient la majorité des parts au sein du consortium KOWL qui porte le projet ; l'achèvement des travaux est annoncé pour 2020.
- *Les éoliennes flottantes Golfe du Lion* (EFGl), dans la zone de Leucate en Méditerranée (24 MW), utilisera quatre turbines Senvion de 6 MW. Mené par Engie, le projet associe EDPR et la Banque des Territoires (filiale du groupe Caisse des Dépôts). Le groupe Eiffage assurera la construction des flotteurs.

Trois autres modèles de flotteurs apparaissent dans les projets pré-commerciaux lancés en France :

- *Eolmed* (24 MW) à Gruissan, en Méditerranée, mettra à profit l'expérience acquise par Ideol avec ses flotteurs en barges semi-submersibles ; construits par Bouygues Travaux Publics, ils recevront des éoliennes Senvion de 6 MW.
- *Provence Grand Large* (24 MW), sur la zone de Faraman en Méditerranée, sera équipé de flotteurs à câbles tendus conçus par SBM et IFPEN, deux acteurs très expérimentés dans le secteur pétrolier, et comportera trois turbines Siemens-Gamesa de 8 MW. Le projet est piloté par EDF Renouvelables.
- *Les éoliennes flottantes de Groix* (24 MW), en Bretagne, porté par l'opérateur français EOLFI associé au groupe chinois CGN, se composera de 4 éoliennes sur flotteurs de conception Naval Group (acteur majeur de la construction navale, ex-DNCS) fabriqués en collaboration avec Vinci. Les turbines de 6 MW devaient être fournies par General Electric, mais ce fabricant y a renoncé ; EOLFI va se tourner vers un autre constructeur.

## Les options retenues

Tous les développeurs européens des projets parvenus au stade pré-commercial ont choisi des modèles de flotteurs que l'on appelle « agnostiques », car ils peuvent recevoir des turbines existantes sur le catalogue des constructeurs. Avec ce choix, les porteurs de projet bénéficient d'engins de forte puissance déjà éprouvés, des années d'expérience accumulées sur ces turbines dans l'*offshore* sur fondation et des prix correspondant à une fabrication en séries longues. Cette option conservatrice a profité à trois fournisseurs, qui ont capté la totalité des

commandes (Siemens-Gamesa, Senvion et MHI-Vestas) ; tirant profit de ce nouveau retour d'expérience, ils pourraient ainsi distancer les constructeurs de turbines innovantes, malgré les qualités intrinsèques de ces dernières (voir encadré en fin du chapitre 1).

Le choix de flotteurs inspirés des modèles en usage dans l'*offshore* pétrolier et gazier et de turbines aux performances reconnues a facilité le financement des projets. Les détenteurs de capitaux et les banques considèrent l'éolien flottant comme une filière dont les risques restent difficiles à apprécier ; le recours à des composants validés dans d'autres secteurs leur apporte quelques garanties. Le même raisonnement s'applique aux assureurs, qui déterminent leurs tarifs en fonction des historiques de sinistres. Dans le cas de l'éolien flottant, ils peuvent pallier l'absence d'historiques spécifiques par des rapprochements avec des industries voisines lorsque les équipements présentent des similitudes. Pour l'heure, les inquiétudes des assureurs se focalisent sur les ancrages et sur les câbles électriques ; ils indiquent que près de 80 % des sinistres constatés dans l'éolien *offshore* sur fondation, en coûts pour les opérateurs, proviennent de défauts électriques<sup>12</sup>.

Une autre option privilégiée par la plupart des développeurs consiste à prévoir que les opérations de maintenance lourde auront lieu à terre, l'éolienne défectueuse étant « débranchée » et remorquée au port. La complexité accrue des systèmes d'ancrages et raccordements électriques nécessités par ce choix se trouve compensée par le moindre coût de la maintenance, notamment en raison des garanties que demandent les entreprises pour le personnel travaillant en hauteur sur des installations oscillant avec la houle.

Si certaines options sont communes, d'autres sont divergentes, et leurs motivations expliquent pourquoi plusieurs modèles se partagent les huit opérations pré-commerciales listées plus haut. Une première considération concerne les aménagements portuaires. Le modèle Hywind comporte un flotteur vertical dont la partie immergée mesure environ 80 mètres, pour une turbine de 6 MW, afin de lui conférer la stabilité requise. Le montage à terre exige donc une profondeur équivalente le long du quai, qui ne se trouve que dans un petit nombre de ports. Pour les autres modèles, une profondeur à quai de 10 à 15 mètres suffit, ce qui élargit grandement le champ des possibilités.

Une seconde considération vise la nature des composants. Plusieurs flotteurs en phase pré-commerciale peuvent être construits en béton à la

---

12. D. Young, *Predicting Dynamic Subsea Cable Failure for Floating Offshore Wind*, ORE Catapult, septembre 2018, p. 3.

place de l'acier, une solution qui offre trois avantages : le prix du béton reste prévisible à long terme (alors que le prix de l'acier fluctue au gré du marché international), la construction se fait sur le site, avec un approvisionnement local, et le béton résiste bien à l'agressivité des milieux marins. Au choix sur la nature des composants s'ajoute celui sur leur origine. L'acceptabilité des projets implique parfois un contenu local élevé ; on retiendra alors le modèle qui maximise les interventions sur site. Une solution diamétralement opposée consiste à fabriquer les divers éléments du flotteur en usine, quel que soit son emplacement dans le monde, et à les livrer dans la zone portuaire pour le seul assemblage final. Les flotteurs de conception modulaire répondent à cet objectif.

Ce bref tour d'horizon des options ouvertes aux porteurs de projet laisse penser que la diversité des opérations engagées au stade pré-commercial n'aboutira pas nécessairement à la sélection d'un seul modèle gagnant, mûr pour s'imposer sur tous les marchés. Il paraît probable que plusieurs types d'installations prouveront leur fiabilité technique et leur intérêt économique, les rendant aptes à répondre chacun à un type d'appel d'offres précis.

## Aspects économiques

Les éoliennes flottantes présentent des atouts qui devraient leur ouvrir à terme de larges marchés. Rappelons que le montage se fait sur la terre ferme ; l'ancrage ne requiert que des fondations sommaires ; des remorqueurs ordinaires conviennent pour la mise en place, contrairement aux éoliennes sur fondation, qui nécessitent des barges autoélévatrices (*jack-up vessels*) très coûteuses ; elles accèdent à des zones maritimes bien ventées, procurant un facteur de chargé élevé ; enfin leur démantèlement s'effectue lui aussi à terre, aboutissant à un recyclage quasi intégral, après qu'on ait ramené tout l'équipement au port. Ce dernier point prend de l'importance compte tenu de l'enjeu que représente la récupération des terres rares et autres matériaux critiques contenu dans les turbines.

Au stade pré-commercial, ces atouts ne suffisent pas à rentabiliser l'investissement, de sorte que la plupart des projets n'ont pu voir le jour qu'à l'aide de subventions. À titre indicatif, les quatre projets en cours en France recevront une aide à l'investissement s'élevant au total à 330 millions d'euros (M€) et le courant produit sera acheté au tarif préférentiel de 240 €/mégawatt-heure (MWh) pendant 20 ans<sup>13</sup>. De son

---

13. Ministère de la Transition Écologique et Solidaire (MTES), « Appel à projet pour le déploiement de fermes pilotes éolien flottant en mer », 4 septembre 2018, disponible sur : [www.ecologique-solidaire.gouv.fr](http://www.ecologique-solidaire.gouv.fr). Pour le tarif d'achat : *Enerpresse*, 13 avril 2017.

côté, le projet Windfloat Atlantic au Portugal a reçu les apports de 29,9 M€ issus du programme européen NER 300 et 6 M€ du gouvernement portugais, complétés par un prêt à conditions préférentielles de 60 M€ de la BEI<sup>14</sup>.

Le besoin de soutien s'explique par de multiples raisons. En premier lieu, cette technologie ne bénéficie pas encore de la fabrication en série qui s'applique aux éoliennes *offshore* sur fondation (par exemple le champ Walney Extension, en mer d'Irlande, compte 87 machines identiques). En second lieu, les dispositifs de suivi sur site demeurent expérimentaux ; il s'agit de caméras ou jauges de contraintes destinées à surveiller les pièces sensibles afin de réduire les frais de maintenance. À ce stade, il est donc encore impossible de mutualiser les moyens de maintenance, une organisation qui a beaucoup contribué à diminuer leur coût dans l'éolien sur fondation. En troisième lieu, les banques et investisseurs apprécient peu les nouveautés ; ils demandent une prime de risque qui majore sensiblement le coût des projets. Il en va de même pour les compagnies d'assurance, qui n'accordent leur garantie qu'en échange de primes élevées. En dernier lieu, les organismes de certification manquent eux aussi de points de repère et exigent parfois des mesures onéreuses pour renforcer la sécurité des installations, mesures qui pourront vraisemblablement être ajustées avec l'accumulation des retours d'expérience<sup>15</sup>.

L'existence de plusieurs modèles de flotteurs dans les projets au stade pré-commercial brouille les comparaisons avec les éoliennes *offshore* sur fondation, car le flotteur représente une fraction considérable du coût d'une éolienne flottante. Pour s'affranchir de cette inconnue, on raisonne donc en coût moyen. En dépit de son caractère artificiel, cette méthode pointe les composants sur lesquels la réduction des coûts paraît prioritaire. La figure 7 montre clairement que l'effort majeur devra porter sur le flotteur. À cet égard, les flotteurs en béton coûtent toujours moins cher que leurs équivalents en acier, qui pèsent entre 1 000 et 1 500 tonnes selon les modèles<sup>16</sup>.

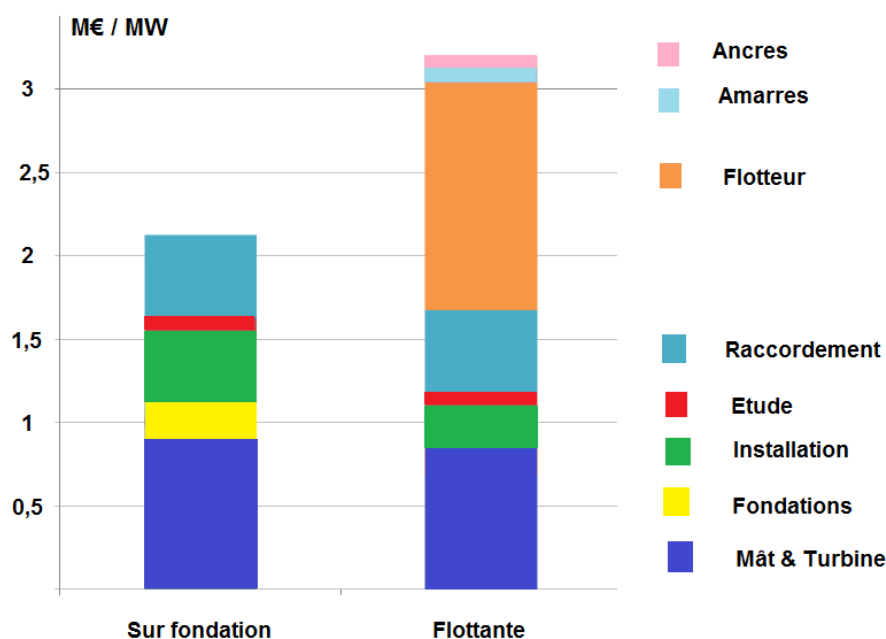
---

14. Banque européenne d'investissement, *Communiqué de presse*, 19 octobre 2018.

15. Les projets français subissent une cause supplémentaire de coût, liée à l'insuffisance des données scientifiques disponibles sur les milieux marins. Chaque site appelle en conséquence une étude approfondie, soumise à l'Autorité Environnementale (organe attaché au Ministre en charge de l'Environnement) ; son avis conditionne l'autorisation de construire et exploiter l'installation. La pauvreté des connaissances donne une grande latitude d'appréciation à cette autorité, qui accroît pour les développeurs l'incertitude sur son avis final.

16. Carbon Trust, *Floating Offshore Wind: Market and Technology Review*, juin 2015, p. 47 et 80. On a retenu ici un taux de change en 2015 de 0,72584 livre sterling pour 1 euro (Source : Eurostat).

Figure 7 : Comparaison des principaux postes du CAPEX



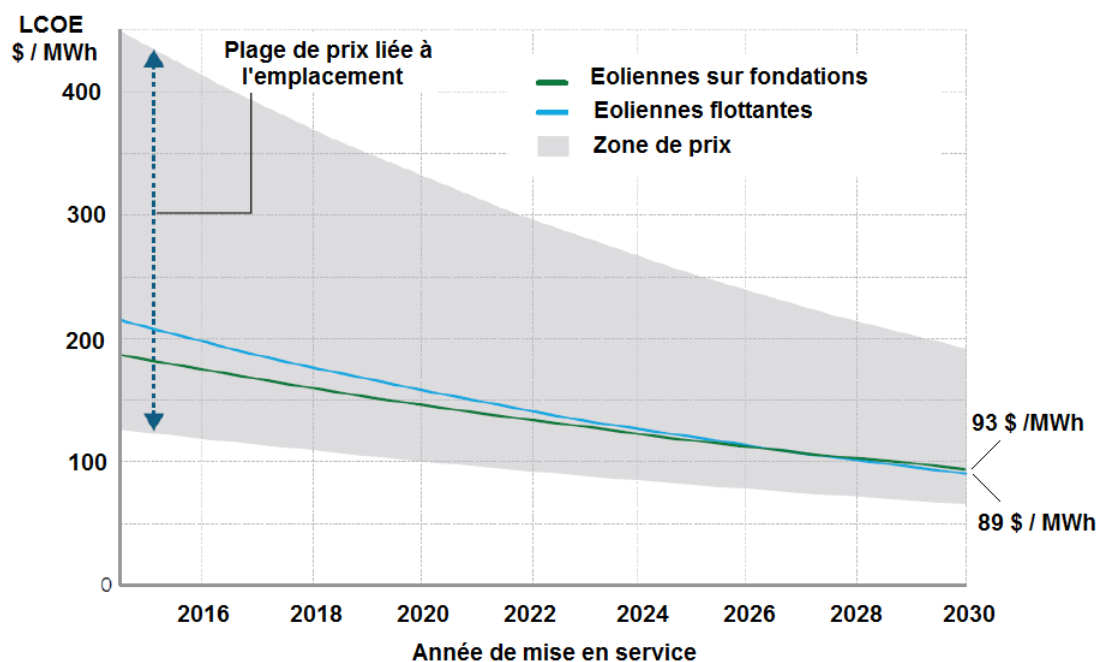
Source : ECN, Cost Modelling of Floating Wind Farms, op. cit.

Graphique adapté par l'auteur. Le centre de recherche ECN est devenu TCO en 2018.

Malgré l'écart sur le CAPEX, les simulations indiquent que le coût actualisé (Levelized Cost of Energy - LCOE) de l'électricité produite par une éolienne *offshore* flottante devrait être inférieur à celui d'une éolienne équivalente sur fondation. En effet, les éoliennes flottantes engendreront en principe des dépenses moindres en maintenance (OPEX) et produiront davantage d'électricité par MW installé, car étant libéré de la contrainte de profondeur, on peut les installer dans des sites mieux ventés et les implanter sur une aire marine élargie, réduisant ainsi les phénomènes de sillage qui nuisent à la productivité. Une étude de référence britannique de 2016 donne ainsi un coût théorique du MWh légèrement en dessous de 125 €/MWh pour l'éolienne flottante et légèrement au-dessus pour une éolienne sur fondation<sup>16</sup>. La réalité paraît bien sûr différente : contrairement aux simulations, les éoliennes flottantes ne jouissent pas d'un coût du capital identique à celui des éoliennes sur fondation, qui a fortement chuté en quelques années, un paramètre crucial dans le coût final, et elles n'ont pas encore engrangé les acquis tirés des expériences variées et des grandes séries qui permettent aujourd'hui aux parcs sur fondation d'annoncer des LCOE sensiblement inférieurs à 100 €/MWh.

Une projection prenant en compte les effets d'apprentissage et les effets d'échelle qui s'appliqueront aux éoliennes flottantes donne une chute du LCOE aussi rapide pour ces dernières que celle constatée pour les éoliennes sur fondation, dès lors que le rythme des commandes devient comparable. Si l'on admet que les premières bénéficieront en outre de certaines améliorations destinées aux secondes (telles que la réduction du poids de la nacelle ou la baisse du coût des composants électriques), les courbes de LCOE devraient se croiser avant la fin de la décennie, selon une étude américaine<sup>17</sup>. La figure 8 en fournit l'illustration. Le coût de départ semble cohérent avec le LCOE divulgué en France, qui inclut les dépenses de raccordement électrique et celles des études préalables. Il se situe au même niveau que celui des premières éoliennes sur fondation attribuées en France en 2012, supérieur à 210 €/MWh, et l'on a vu que ce LCOE avait baissé de manière spectaculaire dès 2019, chutant à un tarif de référence de 44 €/MWh pour le parc de Dunkerque, hors coûts de raccordement<sup>18</sup>.

**Figure 8 : Évolution des LCOE des filières éoliennes flottantes et sur fondation**



Source : National Renewable Energy Laboratory, *A Spatial-Economic Cost-Reduction Pathway Analysis for U.S. Offshore Wind Energy Development from 2015–2030*, op. cit.

17. National Renewable Energy Laboratory, *A Spatial-Economic Cost-Reduction Pathway Analysis for U.S. Offshore Wind Energy Development from 2015–2030*, septembre 2016, p. 93, disponible sur : [www.nrel.gov](http://www.nrel.gov).

18. Commission de Régulation de l'Énergie, *Rapport de synthèse sur le Dialogue concurrentiel*, n°1/2016, p. 9.

## Impact environnemental et acceptabilité sociale

L'impact d'une éolienne *offshore* sur les oiseaux ne diffère pas selon que l'installation est posée sur fondation ou flottante ; en revanche il varie pour les animaux marins. En principe, durant sa phase de mise en place, une éolienne flottante engendre moins de nuisance auprès de la faune océanique qu'une éolienne sur fondation. Le battage des pieux pour asseoir la fondation perturbe en effet profondément la quasi-totalité des animaux vivant dans la zone des travaux. La réalisation des ancrages d'une éolienne flottante reste nettement moins intrusive. Par contre, les mouvements du flotteur peuvent se transmettre aux chaînes d'ancrage et aux câbles, provoquant alors des bruits et des frottements sur les fonds marins, préjudiciables à leurs hôtes naturels. L'impact précis varie avec chaque site et appelle une étude locale approfondie avant toute conclusion.

Au-delà de la phase d'implantation, une éolienne flottante impose des restrictions de pêche supérieures à celles d'une éolienne sur fondation, en raison des câbles et chaînes d'ancrage susceptibles d'être déplacés par les chaluts. Une zone de sécurité d'environ un kilomètre de diamètre s'applique, interdisant aussi le mouillage et les activités sous-marines ; seul le transit des petits navires reste autorisé, jusqu'à 200 mètres des flotteurs. Ce périmètre protégé peut devenir un espace favorable à la conservation animale, car de nombreuses espèces marines s'éloignent des côtes au moment de la reproduction. Là encore, des études du milieu local, site par site, seront utiles pour apprécier pleinement les éventuels bénéfices écologiques d'un parc d'éoliennes flottantes. Les exploitants des premiers parcs pré-commerciaux ont pour la plupart accepté de contribuer à ces études en équipant leurs installations de dispositifs de monitoring et en respectant les protocoles d'observations préconisés par les chercheurs.

Les éoliennes flottantes étant moins tributaires de la profondeur et de la qualité du plancher océanique que les éoliennes *offshore* sur fondation, les pouvoirs publics disposent d'une plus grande liberté pour l'implantation des parcs. On pourra en conséquence sélectionner des sites détenant peu d'attrait, loin des zones les plus touristiques et les plus favorables à la pêche, loin également des couloirs de migration des oiseaux, de façon à réduire les nuisances et les risques de recours en justice contre les projets.



## Encadré 2 : L'éolien flottant aux États-Unis

Les États-Unis ont exploité très tôt l'énergie éolienne à terre ; ils détenaient à fin 2018 une capacité installée de 97 GW, soit 17 % du parc mondial, ce qui en fait le deuxième plus grand pays, derrière la Chine qui a mis en service 207 GW (45 % du parc mondial)<sup>19</sup>. Contrairement à la Chine, les États-Unis n'ont guère montré d'intérêt pour l'éolien *offshore* jusqu'en 2016. Cette année-là, deux ministères fédéraux, Énergie (DOE) et Intérieur (DOI), ont présenté un rapport conjoint détaillant le potentiel éolien maritime du pays et dévoilant une stratégie pour sa mise en valeur<sup>20</sup>. Ce rapport insiste sur les atouts de l'éolien flottant.

Trois zones maritimes présentent des régimes des vents favorables à cette énergie :

- le nord du littoral Atlantique, face à la Nouvelle Angleterre,
- sur le Pacifique, face à la Californie,
- enfin les côtes entourant l'État d'Hawaï.

Ces zones font précisément face à des États sensibles aux enjeux climatiques et déterminés à développer leurs ressources renouvelables ; la Californie et Hawaï ont adopté un objectif de 100 % d'énergies renouvelables dès 2045.

Fin 2018, l'organe fédéral habilité à délivrer les autorisations d'exploitation du domaine maritime avait attribué 15 concessions, toutes sur la façade atlantique ; trois projets avaient franchi le stade suivant et se trouvaient en cours d'instruction pour la remise du permis de construire et de produire (Vineyard Wind, Deepwater Wind South Fork et Bay State Wind), tous trois face à l'État du Massachussets et destinés à des éoliennes sur fondation.

Les États de Californie, Maine et Hawaï manifestent néanmoins un vif intérêt pour la filière flottante, car leurs aires les mieux ventées se situent dans des espaces maritimes trop profonds pour les turbines sur fondation. Trois zones font l'objet d'études préliminaires en Californie (au nord : Humboldt, au centre : Morro Bay and Diablo Canyon) et deux zones au large d'Hawaï (Oahu North et Oahu South).

19. Global Wind Energy Council, *Global Wind Report 2018*, avril 2019, p. 26 et 29.

20. Department of Energy & Department of the Interior, *National Offshore Wind Strategy*, 2016.

Les perspectives californiennes suscitent un fort attrait industriel : pas moins de 14 consortiums ont déposé une « manifestation d'intérêt » en vue des attributions ultérieures des concessions (et quatre consortiums pour Hawaï<sup>21</sup>).

Le Maine a néanmoins agi le premier, en soutenant un projet que l'on peut qualifier de pré-commercial, *New England Aqua Ventus I*, composé de deux éoliennes de 6 MW sur flotteurs en béton de type VoltornUS, un modèle mis au point par l'université de l'État. Ce projet a reçu une subvention de 10,7 M\$ du DOE<sup>22</sup>.

---

21. E. Lindow et J. Barminski, Bureau of Ocean Energy Management (US Department of the Interior), congrès FOWT-2019, 25-26 avril 2019.

22. Description du projet VoltornUS : « *Offshore* wind energy », University of Maine, disponible sur : <https://composites.umaine.edu>.

# Suggestions relatives aux politiques publiques et aux stratégies industrielles

## Les atouts de l'Europe

L'UE a adopté un objectif de 32 % pour la part des énergies renouvelables dans sa consommation finale d'énergie en 2030. Sa stratégie de long terme vise une économie largement décarbonée en 2050, voire une neutralité carbone, ce qui impliquerait une part d'énergies renouvelables comprise entre 81 et 85 % dans le mix électrique<sup>23</sup>. Les projections disponibles à cette échéance montrent qu'un tel ratio appelle une croissance soutenue des capacités installées photovoltaïque et éolienne. Des « gisements » importants subsistent à terre ; toutefois la compétition entre les différents usages sur les aires propices renchérit le coût du foncier et limite les perspectives. L'UE dispose d'une ressource considérable en éolien maritime, mais la fraction facilement accessible, déjà exploitée par des éoliennes sur fondation, est concentrée dans la partie méridionale de la mer du Nord, ce qui en restreint l'accès à un petit groupe de pays. Environ la moitié de la zone la plus favorable bénéficie au Royaume-Uni, qui s'apprête à quitter l'UE. La technologie de l'éolien *offshore* flottant étend sensiblement le périmètre de la ressource en Europe et dans le monde, car la plupart des domaines maritimes bien ventés à l'échelle du globe sont inadaptés à l'éolien sur fondation. Un essor de la filière éolienne flottante dans l'UE offre donc plusieurs avantages : augmenter les chances d'atteindre des objectifs ambitieux, répartir les capacités de production électriques dans un plus grand nombre d'États et ouvrir un marché mondial prometteur aux acteurs européens, aujourd'hui précurseurs.

L'Europe abrite en effet le plus grand nombre de réalisations et de projets avancés, conférant à ses opérateurs une compétence encore rare au niveau international. Leur expertise est nourrie par les retours d'expérience de l'éolien *offshore* sur fondation, dont près de 80 % de la capacité installée sur la planète se situe dans les eaux européennes<sup>24</sup>. Parmi les membres de

---

23. Commission Européenne, *In-depth analysis in support of the Commission communication COM(2018) 773*, 28 novembre 2018, p. 75, disponible sur : <https://ec.europa.eu>.

24. Global Wind Energy Council, *Global Wind Report 2018*, *op. cit.*

l'OCDE, nos principaux concurrents commerciaux, Corée du Sud, États-Unis et Japon n'ont découvert que récemment les atouts de cette technologie et s'engagent avec quelques années de retard sur le chemin pris par les européens en vue de la maîtriser. L'UE détient une avance spécifique sur la Corée du Sud et le Japon, car ces deux pays n'exploitent pas de plateformes de forage gazières ou pétrolières en mer ; or nous savons que l'éolien *offshore* flottant reprend de multiples composants mis au point pour ces dernières. La Chine suit une démarche différente, en prenant des participations dans les projets existants ou les entreprises pionnières (le groupe China Three Gorges détient par exemple 23 % du capital du groupe EDP).

Dans le premier chapitre, nous avons mis en évidence la complexité des phénomènes physiques à prendre en compte pour concevoir un équipement fiable. Le tracé des flotteurs implique une modélisation appuyée sur des outils mathématiques tels que l'analyse temporelle et les équations associant fluides et solides, qui requièrent de fortes puissances de calcul. Les bureaux d'études européens sont bien pourvus, à la fois en compétences humaines et en ressources informatiques, pour mener à bien ces travaux. L'Europe a ouvert par ailleurs plusieurs centres de recherche et d'expérimentation, associés à des équipes universitaires, permettant de mener à bien les tests indispensables. On trouve des sites d'essai sur mer en Écosse, France, Irlande, Norvège...

Le premier chapitre insiste aussi sur le phénomène de fatigue des matériaux, particulièrement prononcé dans la filière *offshore* flottante. À défaut de pouvoir supprimer complètement ce phénomène, on en diminue les conséquences grâce à une qualité très élevée de chaque composant. Cette qualité s'obtient par le choix d'alliages spéciaux, dotés des propriétés mécaniques recherchées, ainsi que par des procédés de fabrication rigoureux, qui évitent la formation de microfissures ou zones de fragilité dans le produit livré. Sur ce terrain également, les entreprises de divers pays européens possèdent le savoir-faire requis.

Les paragraphes qui précèdent suscitent donc une interrogation légitime : quelles seraient les conditions à réunir pour que l'Europe conserve sa prééminence ? Cette question prend toute son importance si l'on considère que l'éolien flottant pourrait devenir la technologie dominante dans l'*offshore*, y compris dans les mers peu profondes, du fait que les machines s'assemblent à terre, ne nécessitent pas de navires spécialisés pour leur mise en place et semblent peu intrusives pour les milieux naturels. Un spécialiste affirme que « le flotteur sera à l'*offshore* du futur ce que la batterie est à l'automobile de demain ».

## Considérations relatives au cadre européen

La technologie des éoliennes flottantes demeurant encore dans une phase naissante, une aide publique à la recherche semble indispensable. Les entreprises vont certes engager de leur côté un effort de recherche privée, mais compte tenu de leur souci de compétitivité sur les activités constituant leur cœur de marché, les fonds disponibles resteront limités. L'aide publique provient des budgets de recherche nationaux ou des instruments communautaires ; ceux-ci abondent prioritairement les actions retenues dans les Plans Stratégiques pour les Technologies Énergétiques (SET Plans), destinés à créer des synergies entre acteurs de la recherche. La filière flottante a été incluse dans le SET Plan Éolien, et l'UE remplit bien son rôle à son égard. Sur huit projets de recherche concernant l'éolien flottant enregistrés au sein du programme Horizon 2020 à la fin de l'année 2018 et totalisant un effort de 28,8 M€, les fonds communautaires procurent 23 M€, soit près de 90 % de la dépense prévue<sup>25</sup>. Ce montant se compare cependant défavorablement avec les 28 M\$ récemment annoncés par l'agence américaine ARPA-E sur le seul projet ATLANTIS, visant à concevoir des rotors de turbine allégés pour les éoliennes flottantes<sup>26</sup>. L'ARPA-E n'avait pourtant pas défini de programme dédié à l'éolien *offshore*, mais ses dirigeants disposent d'une liberté d'action facilitant les décisions rapides.

Au-delà de l'aide à la recherche, l'UE apporte un soutien à l'investissement sous forme de prêt à taux bonifié par l'intermédiaire de la BEI ou d'apports issus du programme NER 300 et plusieurs États contribuent au financement des ouvrages par une subvention initiale. Les contributions nationales sont soumises à l'approbation de la Commission européenne. Les services de la Direction générale de la concurrence (DG Concurrence), chargés d'étudier les notifications, ont autorisé jusqu'à présent sans difficulté les subventions versées directement par les États ainsi que les tarifs d'achat garantis pour l'électricité produite par les premières fermes pré-commerciales. Chaque projet fait toutefois l'objet d'un examen spécifique, de sorte que ni les États ni les développeurs ne disposent de visibilité à long terme. En outre, les règles encadrant les aides

---

25. Voir : Community Research and Development Information Service, « Projects & results », disponible sur : <https://cordis.europa.eu>. Les huit projets pris en comptes sont : EDOWE, FLOTANT, FLOATMAST BLUE, LEADFLOAT, LIFE 50 PLUS, PIVOTBUOY, SAFS et SATH.

26. Advanced Research Projects Agency-Energy (ARPA-E), *The Aerodynamic Turbines, Lighter and Afloat, with Nautical Technologies and Integrated Servo-control (ATLANTIS) programme*, DE-FOA-0002051, 3 février 2019.

aux sources renouvelables d'électricité arriveront à leur terme en 2022<sup>27</sup>, et nul ne sait quelle sera la future grille d'analyse de la DG Concurrence. Cette dernière préconise notamment des appels d'offres « technologiquement neutres » qui handicapent les filières émergentes.

La primauté du droit de la concurrence et les incertitudes qui en résultent contreviennent à toute perspective de politique industrielle, un besoin pourtant exprimé dans diverses capitales et même par certains commissaires européens. De toute évidence, l'éolien *offshore* flottant pourrait faire partie des priorités industrielles européennes et bénéficier à ce titre d'un cadre de développement spécifique. Ce cadre ne se limiterait pas aux règles de concurrence mais engloberait aussi une application effective du règlement européen sur le filtrage des investissements directs étrangers, récemment approuvé par le Conseil et le Parlement. Pour en saisir l'utilité, rappelons que le groupe EDP a fait l'objet d'une tentative d'achat de la part du groupe China Three Gorges, détenu à 100 % par l'État chinois ; or EDP fait partie des leaders mondiaux de l'éolien *offshore* flottant par le biais de sa filiale EDPR, laquelle a justement reçu un prêt de 60 M€ de la BEI pour le projet de ferme WindFloat Atlantic<sup>28</sup>.

## Considérations relatives aux politiques nationales

Les trajectoires de prix suivies dans l'éolien *offshore* sur fondation font apparaître un « effet d'échelle » : le prix moyen baisse au rythme où les volumes mis en service augmentent<sup>29</sup>. Pour que cette tendance vertueuse s'enclenche au profit de l'éolien flottant, il convient que les acteurs soient assurés d'un développement régulier sur longue période. Dans ce cas, les autorités portuaires procéderont aux investissements nécessaires, les constructeurs lanceront des productions en série, les retours d'expérience permettront une juste allocation des risques financiers, les banques abaisseront leurs taux, les capitaux afflueront...

Aucun pays européen ne semble hélas prêt à s'engager sur le long terme. La France apparaît comme le seul État ayant retenu l'éolien flottant parmi les sources d'énergies renouvelables à développer d'ici 2030<sup>30</sup>, mais

---

27. Commission européenne, *Lignes directrices concernant les aides d'État à la protection de l'environnement et à l'énergie pour la période 2014-2020*, réf. C 200/1, 28 Juin 2014. La validité de ces lignes directrices est prolongée jusqu'en 2022.

28. Banque européenne d'investissement, *Communiqué de presse*, 18 octobre 2018.

29. Insistons sur le fait qu'on parle d'un prix moyen, qui n'exclut pas des variations importantes entre projets.

30. MTES, *Programmation Pluriannuelle de l'Énergie – Synthèse*, 23 janvier 2019, p. 22, disponible sur : [www.ecologique-solidaire.gouv.fr](http://www.ecologique-solidaire.gouv.fr). Ces indications figurent également dans le

selon un programme manquant de continuité et restant flou au-delà de 2022. Le ministre a indiqué que la nouvelle version de la Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) qui sera mise en consultation à l'automne 2019 prévoirait trois appels d'offres pour des parcs éoliens flottants commerciaux, un de 250 MW au sud de la Bretagne en 2021 puis deux parcs de 250 MW chacun en Méditerranée, étendus ultérieurement pour atteindre plus de 750 MW « en cas de bonne performance sur les tarifs »<sup>31</sup>. De son côté, le Royaume-Uni n'entend pas différencier ses appels d'offres pour l'éolien *offshore* en fonction des technologies ; les éoliennes flottantes ne pourront gagner contre leurs rivales sur fondation qu'au moment où leurs coûts deviendront inférieurs.

Les hésitations de la France et de ses voisins s'expliquent par les contraintes existantes sur les budgets publics et par la crainte d'un prix du MWh encore élevé durant les premières années de déploiement de la filière, sans certitude sur la pérennité des emplois créés. Peu de peuples font preuve du « consentement à payer » qui s'est manifesté au Danemark et en Allemagne en faveur de l'éolien terrestre et du solaire photovoltaïque durant les dernières décennies, et ce dernier pays a pu longtemps distordre les tarifs afin de prémunir son industrie de prix élevés, au détriment des consommateurs domestiques, une situation moins bien tolérée désormais par la DG Concurrence.

Les gouvernements gardent cependant en main plusieurs leviers pour réduire le coût des projets ; ils concernent le volet réglementaire. Clarifier les textes législatifs, simplifier les procédures administratives, raccourcir les délais d'obtention des permis, accélérer le traitement des recours en justice... autant de mesures peu coûteuses aux États et très bénéfiques aux acteurs. La France a engagé ce processus qui semble avoir porté ses fruits pour le dernier projet d'éoliennes *offshore* sur fondation, à Dunkerque, processus qui devrait faciliter aussi la préparation des quatre projets de fermes éoliennes flottantes en cours. Les pouvoirs publics gagneraient à aller plus loin, en prenant en charge la levée des risques d'acceptabilité très en amont des projets : pêche, tourisme, immobilier, trafic maritime. Cette orientation ne signifie pas un assouplissement des règles ; des dispositions strictes conditionnent au contraire l'acceptation de tailles de plus en plus importantes pour les fermes flottantes ; on parle ici de la mise en œuvre de ces règles par les autorités publiques (guichet unique, délai d'instruction, etc.).

---

projet de Plan National Énergie et Climat remis par la France à la Commission européenne à la même date.

31. MTES, *Communiqué de presse*, 14 juin 2019.

## Considérations industrielles

Les opérateurs font face au besoin de coopérations resserrées entre acteurs qui travaillaient parfois isolément jusqu'ici. Ainsi les fabricants de turbine ont compris qu'ils devront prendre en compte les contraintes de poids des nacelles, les interactions dynamiques entre leurs machines et les flotteurs, les mouvements de ces derniers engendrant des contraintes particulières de flexion et torsion sur les mâts. Le petit nombre d'éoliennes flottantes en service complique cette analyse pour les fabricants, qui veulent s'affranchir des spécificités de chaque site pour traiter ces données, mais qui reçoivent également des sollicitations pour livrer des turbines différentes selon le régime local des vents (vents forts ou vents modérés par exemple).

Par ailleurs, les acteurs industriels européens perçoivent la nécessité d'atteindre une taille critique, face aux investissements considérables requis par chaque projet ; le récent rapprochement entre les groupes français ENGIE et portugais EDPR illustre cette volonté de conjuguer les forces.

Pour les développeurs de projets aussi, la programmation des opérations appelle des coopérations nouvelles. Ils savaient déjà sécuriser la chaîne de leurs fournisseurs ; il leur faut maintenant organiser des tâches qui s'exécutent en parallèle. En effet, la mise en place des câbles de raccordement électriques et des dispositifs d'ancrage peut se dérouler avant l'arrivée sur le site des machines, de façon à exploiter au mieux les périodes offrant les meilleures conditions météorologiques. L'assemblage des flotteurs et le montage de l'éolienne s'effectuent dans les ports ; ces opérations nécessitent donc des emplacements au sol et des quais dédiés.

Les aménagements portuaires pour l'éolien flottant imposent des décisions difficiles à prendre pour les gestionnaires. La première consiste à engager des investissements considérables pour étendre les zones d'activité (les aires de stockage pourront atteindre 30 hectares<sup>32</sup>), consolider les sols (la charge se situe à 30 t/m<sup>2</sup> environ<sup>33</sup>), renforcer les quais, construire des hangars... sans visibilité sur le développement de la filière, qui dépend encore de choix gouvernementaux. À ce sujet, les appels d'offres sont aujourd'hui décidés au niveau national. Compte tenu de l'engagement de certaines régions en faveur de l'éolien *offshore* flottant, il pourrait leur être accordé de tenter un appel d'offres régional ; ces régions assumeraient

---

32. A. Lee, « Port Readiness for The Construction of 1 GW Wind Farm – A Scotland Case Study », ORE Catapult, congrès FOWT-2019, 25 avril 2019.

33. D. Massol, « Extension of Port-La Nouvelle », Région Occitanie, congrès FOWT-2019, 25 avril 2019.



alors seules une partie des charges qui en résultent, notamment sur le prix du MWh.

Une seconde décision concerne la nature des aménagements, qui varie selon le modèle de flotteur retenu ; or une incertitude subsiste sur les modèles qui domineront dans le futur, au-delà des premières fermes pré-commerciales. Malgré ces doutes, des régions d'Europe se dotent des infrastructures portuaires appropriées aux parcs éoliens flottants. À titre d'exemple, l'Écosse organise un véritable réseau de ports adaptés à cette technologie et trois régions de France, Bretagne, Occitanie et Provence-Alpes-Côte d'Azur aménagent déjà des ports dédiés (la région Occitanie chiffre à 200 M€ les travaux lancés sur le site de Port-La Nouvelle<sup>34</sup>). On notera que ces équipements à terre, à la charge des collectivités, évitent aux développeurs les frais élevés correspondant à l'emploi de navires spécialisés, puisque le montage des installations au port permet ensuite leur acheminement sur site au moyen de remorqueurs ordinaires.

Les charges incombant aux États (subventions), aux pouvoirs publics locaux (aménagements portuaires) et aux consommateurs (prix du kWh élevé) trouveront-elles une compensation par un regain d'activités économiques et de nouveaux emplois ? La filière éolienne *offshore* sur fondation a créé un précédent heureux pour l'UE, les États engagés ayant conservé l'essentiel de la valeur ajoutée et les entreprises européennes ayant acquis une expertise qu'elles peuvent valoriser aujourd'hui auprès des pays disposant d'une façade maritime appropriée.

Il n'est pas certain qu'un processus comparable se reproduise pour l'éolien *offshore* flottant, car il suscite un fort engouement international, avant même que la technologie ait prouvé sa fiabilité à grande échelle. Ainsi, les groupes européens sont amenés à nouer des coopérations de manière plus précoce que l'ont fait leurs prédécesseurs dans l'éolien sur fondation. Ils ouvrent de la sorte à leurs partenaires l'accès à leurs propres acquis. On peut citer dans ce registre l'accord entre Equinor (Norvège) et Korean National Oil Corporation (Corée du Sud), ceux d'Ideol (France) avec China Steel Corporation (Taiwan) puis avec Acacia Renewables (filiale à 100 % de Macquarie Capital Japon) et tout récemment Shinzen Energy (Japon), celui de Naval Group (France) avec Hitachi Zosen (Japon), ou encore celui d'EnBW (Allemagne) avec Trident Winds Inc. (États-Unis). L'ensemble de ces accords répondent à une logique d'entreprises, soucieuses de pénétrer des marchés susceptibles de se développer rapidement. Elles en retireront un surcroît d'expérience qui bénéficiera

---

34. *Ibid.*

aussi à l'UE, mais qui pourrait faire perdre à celle-ci son avance en l'absence d'une politique volontariste.

# Conclusion

Dans un monde invité à accélérer la décarbonation de ses secteurs économiques et énergétiques pour s'inscrire sur une trajectoire compatible avec l'accord de Paris, la technologie de l'éolien *offshore* flottant apparaît comme l'une des plus prometteuses à grande échelle. Elle ouvre l'accès à une ressource immense, relativement bien répartie à la surface du globe et disponible sur de longues périodes tout en exerçant un impact environnemental modéré. Cette technologie nécessite encore des progrès ; elle concerne un milieu naturel hostile et met en œuvre des équipements dont la mise au point n'est pas achevée.

Plusieurs pays européens ont révélé le potentiel de progrès rapides que détient la filière, même si la preuve de la viabilité n'est pas encore complète ; mieux encore, leurs premiers essais ont amené à la conviction que des baisses de coût sont accessibles à moyen terme, susceptibles de rendre cette technologie compétitive face à ses rivales dans le champ des énergies renouvelables. Quatre pays ont atteint le stade pré-commercial, avec des fermes d'une taille significative, propres à valider les différents modèles de flotteurs et préparer les réponses à de futurs appels d'offres : France, Norvège, Portugal et Royaume-Uni (Écosse). Ces États hésitent cependant à fournir l'effort supplémentaire qui restera indispensable pendant encore quelques années pour parvenir à une baisse décisive des coûts.

Leur percée technologique a suscité un fort intérêt de la part de plusieurs pays extra-européens disposant d'une façade maritime, soit qu'ils manquent de ressources naturelles (Corée du Sud et Japon), qu'ils soient très engagés en faveur des sources renouvelables (États de la côte ouest des États-Unis) ou qu'ils pressentent un marché considérable (Chine). Ces pays étoffent leurs programmes de recherche, lancent des expérimentations ; leurs entreprises nouent des partenariats avec leurs homologues du vieux continent et prennent des parts dans les projets européens.

On déplore souvent, au sein de l'UE, le retard pris à s'engager dans les filières porteuses, qu'il s'agisse des technologies de l'information et des communications ou des véhicules électriques. L'éolien *offshore* flottant présente les caractéristiques d'une filière d'avenir, parce qu'elle concerne un marché mondial et parce qu'elle garde des possibilités d'amélioration considérables. Il serait regrettable que l'Europe perde son avance sur ce

terrain faute d'un soutien au bon moment. Ce soutien ne saurait être circonscrit au niveau régional ou national ; on plaide ici pour la création d'une « alliance européenne de l'éolien *offshore* flottant », à l'image de « l'alliance européenne des batteries », avec un appoint communautaire destiné à faciliter les échanges au sein d'un réseau d'acteurs industriels, structurer un programme de recherche étoffé, apporter les capitaux manquants aux projets innovants, définir les qualifications requises, identifier les évolutions réglementaires nécessaires...

Alors que des inquiétudes s'expriment de plus en plus fréquemment sur le maintien d'un secteur industriel vivant en Europe, la filière éolienne *offshore* flottante mériterait d'être considérée comme stratégique.



