

ÉOLIEN OFF-SHORE



Etudiants :

Elodie ALLARD

Maxence HEUGUET

Quentin LAUTRIDOU

Matthieu PAVAGEAU

Enseignant-responsable du projet :

Dany VANDROMME

Date de remise du rapport : **19/06/2017**

Référence du projet : **STPI/P6/2017 – 18**

Intitulé du projet : ***Éolien offshore: caractérisation, déploiements présents et à venir, nouvelles solutions technologiques à venir.***

Type de projet : ***Recherche bibliographique***

Objectifs du projet (10 lignes maxi) :

A travers ce dossier, nous allons essayer de faire un état des lieux de l'éolien offshore en France et dans le monde, aussi bien au niveau technique qu'au niveau des projets déjà mis en œuvre ou à venir.

Mots-clefs du projet (4 maxi) :

- Transition énergétique
- Énergies renouvelables

TABLE DES MATIÈRES

1. Introduction.....	5
2. Méthodologie / Organisation du travail.....	6
3. Débats politiques :.....	7
3.1. Énergies renouvelables et campagne présidentielle :.....	7
3.2. Le programme environnement et de transition écologique :.....	8
3.3. Le débat de la côte d'Opale :.....	8
4. Technique.....	11
4.1. Les différents types d'éoliennes :.....	11
4.2. L'installation en mer :.....	13
4.3. Raccordement électrique :.....	14
5. Projets de parcs éoliens offshore :.....	17
5.1. État des lieux en Europe et dans le Monde:.....	17
5.2. Exemple de parc éolien au large des côtes britanniques :.....	18
5.3. État des lieux en France :.....	20
5.4. Exemple de parc éolien au large des côtes françaises :.....	22
6. Conclusions et perspectives.....	24
7. Bibliographie.....	25

1. INTRODUCTION

L'énergie est un débat majeur de notre monde actuel. Nous en consommons de plus en plus mais les moyens de production sont aujourd'hui critiqués du fait de la pollution engendrée. Certains moyens de production sont dangereux et peuvent causer des gênes auprès des habitants, et avoir des impacts sur la santé. Une solution est le développement des énergies renouvelables telles que les éoliennes (sur terre ou en mer).

A l'étranger, la question de l'éolien offshore est abordée depuis les années 1990. Les pays pionniers, le Danemark, la Suède et les Pays-Bas, lancent des programmes de valorisation du vent maritime. Ces pays sont propices à l'installation d'éoliennes car ils disposent de plateaux continentaux étendus et peu profonds. Le premier parc éolien offshore a été installé au Danemark en 1991 sur le site de Vindeby. Le parc comprenait 11 éoliennes, d'une puissance unitaire de 450 kW, les éoliennes n'étaient alors que des éoliennes terrestres légèrement modifiées. En 2001, le Danemark inaugure, le parc Middelgrunden, qui devient le plus grand parc éolien de l'époque avec 20 éoliennes de 2 MW, distantes de 180 m et disposées en arc de cercle de 3.4 km de diamètre.

Dans le milieu des années 2000, le Royaume-Uni et l'Allemagne se lancent à leur tour dans l'éolien offshore à grande échelle. Fin 2009, 32 parcs éoliens offshore sont en service dans dix pays : le Danemark, le Royaume-Uni, la Suède, les Pays-Bas, l'Irlande, l'Italie, l'Allemagne, la Finlande, la Norvège et la Belgique.

C'est en 2011, 20 ans après le premier parc éolien au Danemark que la France lance son premier appel d'offre dont les résultats sont annoncés en avril 2012 : 4 sites sont attribués pour une capacité installée prévue de près de 1 930 MW.

Afin d'exploiter au mieux le deuxième gisement européen que représente son littoral et un vent du large plus régulier et plus soutenu, la France fait encore des recherches pré-industrielles concernant la complexité de la fabrication et de l'installation d'éoliennes à base flottante.

Dans l'optique de répondre au mieux au sujet de l'éolienne offshore, nous avons posés la problématique suivante: Pourquoi est-il important de développer de nouvelles techniques pour pouvoir exploiter au mieux l'énergie du vent ?

Ainsi, nous allons tout d'abord nous concentrer sur les différents débats politiques. Puis dans une deuxième partie, nous étudierons les aspects techniques de ces installations. Enfin, nous nous concentrerons sur un projet déjà abouti situé au Royaume-Uni et un projet français en cours de développement au large de Saint Brieuc.

2. MÉTHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Nous nous sommes répartis le travail en essayant au mieux de répartir équitablement la charge de travail. Pour cela, pour la plupart, nous avons réparti la recherche d'informations et la rédaction comme suis:

- Introduction:** Élodie Allard, Maxence Heuguet
- Débats Politiques:** Élodie Allard, Maxence Heuguet
- Technique - modèles d'éoliennes:** Quentin Lautridou
- Technique - installation en mer:** Élodie Allard
- Technique – raccordement:** Quentin Lautridou, Maxence Heuguet
- Projets de parc éoliens off-shore:** Matthieu Pavageau
- Conclusion:** Quentin Lautridou

La rédaction du rapport a été précédée d'une phase de recherche d'informations sur le sujet, principalement sur Internet. L'introduction a été rédigée alors que le rapport était déjà rédigé pour moitié et l'écriture de la conclusion a été l'une des dernières choses effectuées, le tout afin de garantir une cohérence entre l'introduction et la conclusion et le reste du rapport.

3. DÉBATS POLITIQUES :

3.1. Énergies renouvelables et campagne présidentielle :

La France s'étant engagée à diminuer les émissions de gaz à effet de serre, la question des énergies renouvelable est évoquée dans les programmes des candidats à la présidentielle 2017.

La réduction d'émission des gaz à effet de serre est un sujet qui concerne le monde entier, et c'est pourquoi il a été débattu lors des dernières conférences de la Cop 21¹.

L'ambition de l'accord de Paris est finalement de réduire des émissions de gaz à effet de serre afin qu'en 2100, le réchauffement climatique soit stabilisé en dessous de 2°C de plus par rapport à la température moyenne de l'ère pré-industrielle, voir même une stabilisation à 1,5°C en renforçant les efforts². Selon Le figaro³, les pays signataires de l'accord de Paris représentent 93% des émissions mondiales.

Les candidats de la gauche sont majoritairement favorables à une sortie complète du nucléaire au bénéfice des énergies renouvelables. En effet, Jean-Luc Mélenchon et Benoît Hamon ont pour projet de fermer petit à petit les centrales nucléaires arrivant en fin de vie. Benoît Hamon explique que, le prolongement de la durée de vie des 58 réacteurs coûterait 50 milliards d'euros. En réalité, d'après Europe 1⁴, cela coûterait le double: 100 milliards d'euros. Ce coût est expliqué par le coût de la maintenance de ces centrales. Ce projet ne peut pas être motivé par l'émission de CO2 de ces centrales nucléaires car, d'après EDF⁵, celles-ci ont une émission de CO2 très faible. De plus cette émission de CO2 est principalement due à la phase de construction de ces centrales. Les candidats expliquent leur ambition de diminuer la proportion des centrales nucléaires par des raisons économiques.

De plus, Jean-Luc Mélenchon s'affirme écologiste et annonce vouloir construire un parc éolien au large de la côte d'opale s'il est élu président (selon l'article du Delta FM publié le 28/09/2016 "Jean-Luc Mélenchon mise sur l'éolien offshore plutôt que sur le nucléaire). Le coût du prolongement des centrales nucléaires est certes très élevé, mais "le ticket de sortie du nucléaire" l'est encore plus explique les Echos⁶. Il s'élèverait à 217 milliards d'euros.

Emmanuel Macron souhaite diminuer la part d'électricité d'origine nucléaire de 75% à 50% en 2025, conformément à la loi de transition énergétique pour la croissance verte.

1 La COP21 est la 21ème Conférence des parties de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques. Cette conférence réuni des dirigeants du monde entier dans le but de parvenir à un accord juridiquement contraignant et universel sur le climat, avec l'objectif de maintenir le réchauffement climatique en dessous de 2°C. <https://www.climatestewards.org/fr/cop21/>

2<http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/cop21-conference-sur-le-climat-de-paris>

3<http://www.lefigaro.fr/sciences/2016/04/22/01008-20160422ARTFIG00325-cop21-un-nombre-record-de-pays-signe-l-accord-a-l-onu.php>

4<http://www.europe1.fr/emissions/le-vrai-faux-de-l-info2/combien-couterait-le-prolongement-de-la-duree-de-vie-des-58-reacteurs-nucleaires-2989880>

5<https://www.edf.fr/groupe-edf/producteur-industriel/nucleaire/atouts/emissions-de-co-sub-2-sub>

6<https://www.lesechos.fr/elections/presidentielle-2017/0211874723519-la-sortie-du-nucleaire-couterait-217-milliards-deuros-2071882.php>

De l'autre côté, les républicains et le front national pensent qu'il est irrationnel de croire que la fermeture totale des centrales nucléaires est envisageable du fait de l'augmentation continue de la consommation énergétique. Ils encouragent évidemment le développement des énergies renouvelables mais pensent que cela est insuffisant.

Pour François Fillon, l'énergie nucléaire est "moderne et sûre" et contrairement à ce qui est fixé par la loi de transition énergétique, il s'est engagé à ne fermer aucun réacteur nucléaire. Pour lui, comme pour Philippe Murer, Conseiller Environnement et Économie du Front national de Marine Le Pen, le vrai problème provient des énergies fossiles et non du nucléaire.

Lors du second tour, la question de l'énergie renouvelable est peu abordée, voire pas du tout. En effet, même en cette période où l'énergie devrait susciter l'attention du monde entier, les électeurs Français sont concentrés sur leurs problèmes de revenus, d'emplois et d'éducation ainsi que sur la question de l'immigration (beaucoup abordée par Marine Le Pen, qui en fait d'ailleurs une question vite réglée). Ils sont donc moins préoccupés, en cette période de crise, par les énergies renouvelables comme les éoliennes offshore. C'est pourquoi les candidats du second tour à la présidentielle de 2017 ne perdent plus leurs temps et leur crédibilité pour répondre à cette lourde question, qui réclame cependant beaucoup d'attention.

3.2. Le programme environnement et de transition écologique :

« J'aurais un plan ambitieux d'investissement dont l'un des piliers sera l'écologie et la transformation de notre modèle de croissance » s'exclame Emmanuel Macron devant son mouvement En-Marche. Il a finalement été élu président de la république française le 8 mai 2017. Dans son programme présidentiel, il affirmait que la transition écologique était une priorité. En effet, sur un budget de 50 milliards d'investissements publics, 15 milliards devraient être consacrés à la transition énergétique et écologique.

« Il faut avoir une vraie stratégie de sortie des énergies fossiles : dans le quinquennat, nous devons fermer toutes les centrales à charbon qui existent encore dans notre pays, avec un accompagnement des personnes et des territoires ». En effet, il est prévu également que toutes les centrales consommant des ressources fossiles (qui représentent près de la moitié de notre consommation) soient fermées en 5 ans, il n'y aura pas non plus de nouvelle attribution de permis d'exploitation d'hydrocarbures et l'exploitation des gaz de schistes restera complètement interdite. L'utilisation du nucléaire doit également diminuer : actuellement 75% de notre énergie provient du nucléaire mais Emmanuel Macron veut diminuer cette part à 50% tout en augmentant celle des énergies renouvelables à plus de 30%. « Nous financerons le développement des énergies renouvelables : d'ici à 2022, nous avons pour objectif de doubler la capacité en éolien et en solaire photovoltaïque. »

3.3. Le débat de la côte d'Opale :

Un projet est défendu par Ségolène Royal, ministre de l'écologie, au large de la côte d'Opale. D'après elle, "C'est un projet qui a été mûrement réfléchi, qui est dans une zone absolument propice, qui complète aussi le projet sur Dunkerque ". Le site fera partie du 3^{ème} appel d'offres lancé par l'état français pour des éoliennes posées, la mise en service est envisagée

pour 2022. Pour Ségolène Royal, ce projet est une bonne chose car cela va créer des emplois : “ il va falloir les construire, il va falloir les installer, il va falloir les entretenir” .

Suite à son annonce, un collectif baptisé Horizon est né pour dire non aux éoliennes offshore et une pétition a été lancée. Les élus du conseil municipal de Berck-sur-Mer ont également voté, à l'unanimité, une motion contre ce projet. Daniel Fasquelle, député, et Bruno Cousein, maire de Berck-sur-Mer énoncent leur arguments contre le projet d'éoliennes . Ils craignent l'impact des éoliennes offshore sur le tourisme et la pollution visuelle de leur littoral.

“La zone industrielle maritime occupera 50 km² et sera hérissée par 75 monstres d'acier et de matériaux composites non recyclables de 150 m d'envergure. Ils culmineront à 180 m au-dessus de la mer. Les fonds marins seront percés par les pieux de fondation. Les sédiments marins seront occupés par un fouillis de câbles électriques. Chaque machine pèsera au minimum 1500 tonnes. Aucune éolienne de ce type et de cette puissance, 6 MW, n'a prouvé en condition réelle sa capacité de résistance et de productivité.”

Dans le site internet anti-éolien Stop éolien⁷. Un paragraphe décrit une grosse partie des inconvénients des éoliennes offshore au large de la côte d'opale. En effet ces éoliennes, qui s'élèveront à plus de 180 m au-dessus de l'eau sur un territoire marin de 50 km², feront “tache” dans le paysage, il y aura une détérioration du paysage marin, ce qui pourrait avoir un impact sur le tourisme. De plus leur fondation en béton au sol, puis leur raccordement électrique à la surface terrestre ainsi que le bruit des travaux auraient un fort impact sur les écosystèmes locaux. Le bruit des travaux fera fuir les animaux marins, les oiseaux migrateurs seront perturbés, les ondes sonores influeraient sur les dauphins et les phoques. Les pêcheurs seront contraints de contourner cette zone, ce qui réduira considérablement leur zone de pêche, il pourrait donc y avoir un impact économique sur la vente de poissons.

Or, en addition à tous ces inconvénients, les éoliennes offshore, présentent aussi des inconvénients par rapport aux éoliennes terrestres. En effet, l'eau de la mer pourrait causer de la corrosion sur ces éoliennes, et leur entretien serait plus coûteux, et en cas de panne, le temps de réparation plus long. De plus, une éolienne offshore est 30 à 50% plus chère qu'une éolienne terrestre.

Un autre problème s'ajoute: il faut faire tourner les éoliennes coûte que coûte, afin que les turbines ne soient pas menacées par le sel des embruns selon le figaro. Pour remédier à ce problème, les éoliennes devraient être équipées d'un moteur diesel (parc offshore de Riffgat au large de borkum). Elles émettraient donc du CO₂, un comble pour une éolienne ?

Le débat serait très vite réglé si on ne prenait que les inconvénients. Or le monde est bien fait et les éoliennes offshore aussi.

En France, le développement éolien a pris du retard. Elle a en effet une faible production d'énergie éolienne par rapport à d'autres pays comme le Danemark (la part de l'éolien dans la consommation électrique atteint 39% en 2014).

Le sol Français a été envahit par les éoliennes et le domaine maritime est un grand domaine que l'on peut exploiter pour nos éoliennes. Installées sur des domaines marins bien choisis lors d'études préalables, les éoliennes produisent de l'électricité pour 80% du temps, ce qui peut être jusqu'à deux fois plus que la production des éoliennes terrestres. De plus, le vent est en phase avec notre consommation d'électricité. En effet, il y a plus de vent en hiver lorsque nous en avons le plus besoin pour notre chauffage, ou encore pour nous éclairer (car il fait jour moins longtemps en hiver) et quand la production d'électricité coûte plus cher et émet le plus de gaz à effet de serre.

7 <http://stop.eolien.offshore.free.fr/>

Lorsque nous évoquons le prix d'une éolienne offshore, un prix 30 à 50% plus cher qu'une éolienne terrestre. Certes plus chère qu'une éolienne terrestre, une éolienne maritime reste tout de même plus sûre et moins coûteuse que les autres moyens de production d'électricité par les énergies renouvelables.

L'installation de gigantesques parcs éoliens offshore implique évidemment des débats sérieux. Il est évident qu'un habitant, qui choisit d'habiter en face de la mer, disposant ainsi d'une magnifique vue et bien sûr d'un couché de soleil: à couper le souffle, ne veut pas de



Illustration 1: Ségolène Royal défend les éoliennes offshore

ces monstres d'aciers pour lui gâcher son tableau de maître. Il est évident aussi que la faune et la flore sont importants pour lui, de même que l'économie de sa région qui influe ces impôts.

Mais il est évident aussi qu'une fois le soleil couché, la lumière d'une bougie ne vaut pas celle d'une lampe IKEA de 50 Watts.

4. TECHNIQUE

4.1. Les différents types d'éoliennes :

Avant d'aborder les aspects techniques de l'éolien offshore, il est nécessaire de définir ce qu'est une éolienne. Il existe deux types d'éoliennes, qui sont les plus développés à l'heure actuelle, les éoliennes à axe horizontal et celles à axe vertical.



Illustration 2: Modèle d'éolienne à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont celles que l'on a le plus l'habitude de voir. Des groupes de ces éoliennes sont, en effet, installées dans beaucoup de campagnes françaises. La désignation « axe horizontal » traduit le fait que l'axe d'attache des pales est horizontal, donc dans la direction du vent. Il est possible de produire ce type d'éolienne dans deux configurations, aval et amont, qui désigne la position des pales par rapport au mât.

Dans une configuration aval, les pales sont placées de sorte qu'elles captent le vent après que celui-ci ait passé le mât. Les pales sont également recourbées vers l'arrière, formant ainsi un cône quand elles sont en rotation, ce qui va faire office de gouvernail, et permet de ne plus s'inquiéter de l'ajout d'un système d'orientation à l'intérieur de l'éolienne. Cependant, le fait que le mât soit placé avant les pales influe énormément sur le flux d'air capté par ces dernières, ce qui les expose à des vibrations très importantes à chaque fois qu'elles passent dans l'axe du mât. De telles vibrations ont un impact sur la durabilité des pales et nécessitent d'installer un système d'absorption de vibrations afin de réduire cette usure.

La configuration amont, quant à elle, est celle qui est la plus répandue. Dans celle-ci, les pales vont capter le vent avant le mât. De telle sorte, le flux d'air capté par les pales n'est pas modifié par la présence du mât. Cependant, dans une telle configuration, les pales subissent la poussée générée par le vent, ce qui nécessite des pales plus rigides afin de limiter les oscillations ainsi que de les éloigner du mât pour éviter tout risque d'accident. Un inconvénient de ce design, est son absence de stabilité naturelle qui nécessite donc l'ajout d'un dispositif particulier afin de contrôler l'orientation de l'éolienne. Il peut s'agir d'un gouvernail ou d'un rotor supplémentaire, mais pour les plus grandes, un dispositif est installé directement à l'intérieur de l'éolienne.

Les éoliennes à axe horizontal sont les plus représentées à l'heure actuelle, cependant, les modèles à axe vertical peuvent avoir un intérêt, principalement en offshore.

Ces modèles à axe vertical ont les pales plus près du sol, ce qui pose problème lorsqu'elles sont installées sur terre en raison de l'inconstance du vent quand on se rapproche du sol, de plus, n'importe quel bâtiment, colline, tumulus, qui pourrait gêner l'écoulement du vent provoque potentiellement une perte de rendement. Cependant, en offshore, le problème est beaucoup moins prononcé en raison des vents plus puissants du large, ainsi que de l'absence d'obstacle pouvant gêner l'écoulement d'air. Un autre inconvénient est que les principes de fonctionnement de ces modèles les rendent sensibles aux vibrations. Toute vibration légèrement trop importante peut potentiellement conduire à la rupture d'une pale ou à la fragilisation de la fixation du mât central.

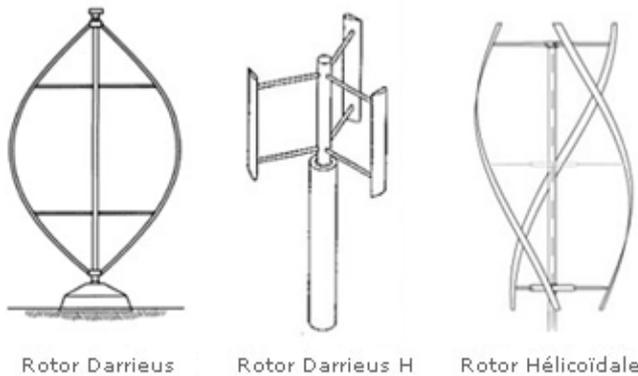
Ces éoliennes ont tout de même l'avantage d'avoir un centre de gravité très bas, tout en pouvant capter le vent, quelle que soit son orientation, ce qui les rend très intéressantes pour une installation offshore, car il n'y aurait pas à poser le problème de l'orientation des pales, et le centre de gravité bas permet une meilleure stabilité sur une plate-forme flottante. Actuellement, le rendement faible de ces modèles a compromis leur production industrielle. En effet, les seuls modèles ayant été produits, l'ont été à hauteur de 500 unités de 300 kW au cours du wind rush californien des années 70, par l'entreprise FloWind.



Il existe deux principaux mécanismes d'éoliennes à axe vertical. Tout d'abord, le rotor de Savonius, qui fonctionne sur le même principe qu'un anémomètre, c'est-à-dire que l'éolienne est composée de corps creux et que la différence d'intensité entre les efforts exercés par le vent sur chacune des faces génère un couple moteur qui va mettre l'éolienne en rotation.

Illustration 3: Modèle d'éoliennes sur le modèle de Savonius

L'autre mécanisme est le rotor de Darrieus qui exploite le couple moteur généré par la combinaison des forces d'intensité auxquelles sont soumises les pales de l'éolienne. Contrairement au mécanisme de Savonius qui utilise des rotors compacts, ce rotor utilise donc des pales, longues fines et flexibles.



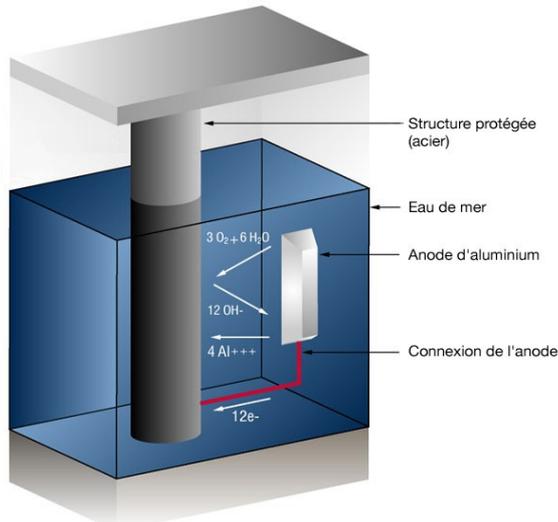
La quantité d'électricité générée est dépendante du diamètre du dispositif, car la partie des pales qui est la plus importante afin de générer un couple conséquent est située dans la zone de plus grand diamètre. Cependant, ce système nécessite également d'être stabilisé par des haubans attachés au sommet du mât, ce qui induit une surface au sol conséquente pour les modèles de plus grande taille.

Illustration 4: Schémas d'éoliennes basées sur le rotor de Darrieus

En termes de génération de puissance, pour un vent de 10 m/s, une éolienne à axe horizontal dotée de pales d'une longueur de 58 m pourrait générer théoriquement 6,5 MW, ces dimensions correspondent à celles des éoliennes modèle M5000 d'Areva d'une puissance de 5 MW. En comparaison, une éolienne sur le modèle de Savonius d'une hauteur de 80 m avec 40 m de diamètre aurait une puissance maximale théorique de 1,1 MW, soit 6 fois moins pour une surface occupée bien plus importante.

4.2. L'installation en mer :

L'installation d'éolienne en mer présente des difficultés qui ne se posent pas sur terre telle que la corrosion. Afin d'éviter la rouille des pylônes en acier des parcs éoliens, ces derniers sont traités par anodes sacrificielles. Les anodes sacrificielles sont composées essentiellement d'aluminium, mais aussi de zinc et de métaux lourds, qui se dissolvent progressivement dans l'eau.



Néanmoins ce qui semble être une solution pourrait bien poser problème. En effet, d'après l'office fédéral du génie hydraulique (BAW)⁸, "Sur une durée de vie de 25 ans, uniquement avec la protection contre la corrosion des fondations d'acier sur lesquelles les éoliennes sont installées, jusqu'à dix tonnes d'aluminium seront libérées dans l'eau de mer pour chaque fondation d'éolienne". Ainsi, l'objectif de développer 6500 MW d'éolienne offshore au large de la côte allemande d'ici 2020 impliquerait une pollution d'environ 13 000 tonnes d'aluminium dans la mer Baltique et la mer du Nord.

Illustration 5: Système de protection par anodes sacrificielles

Une solution serait alors de protéger les éoliennes électriquement, comme le font les bateaux. Cette technique est la protection cathodique, un courant électrique circule depuis une anode auxiliaire vers le métal à protéger, le potentiel est ajusté afin de réduire la vitesse de corrosion du métal. Néanmoins cette méthode est beaucoup plus coûteuse.

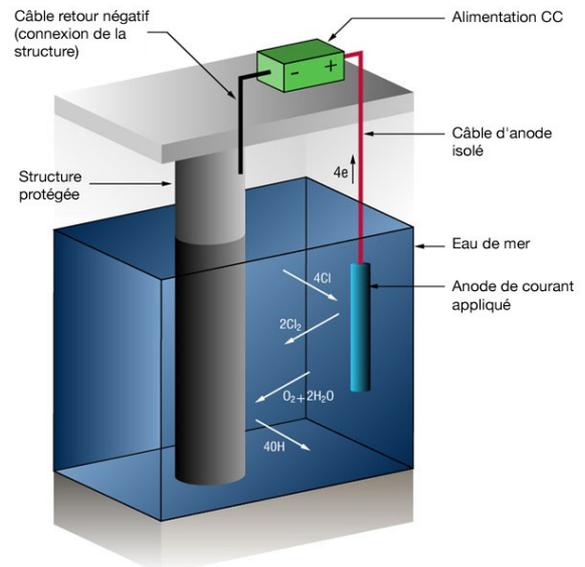


Illustration 6: Système de protection par cathodes électrique

⁸Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) est un organisme de recherche allemand, qui se consacre à quatre domaines : le développement durable, la mobilité (les voies navigables), la sécurité et la protection et les technologies innovantes.
<https://www.science-allemande.fr/fr/tic-et-transport/recherche-appliquee-a-loffice-federal-de-genie-hydraulique-de-nouvelles-informations-disponibles-en-ligne/>

4.3. Raccordement électrique :

Le raccordement des installations offshore au réseau électrique est également important. En effet, produire de l'électricité sans moyen de l'utiliser n'a strictement aucun intérêt, or des installations off-shore posent certains problèmes qui empêchent l'utilisation d'un raccordement classique comme sur terre.

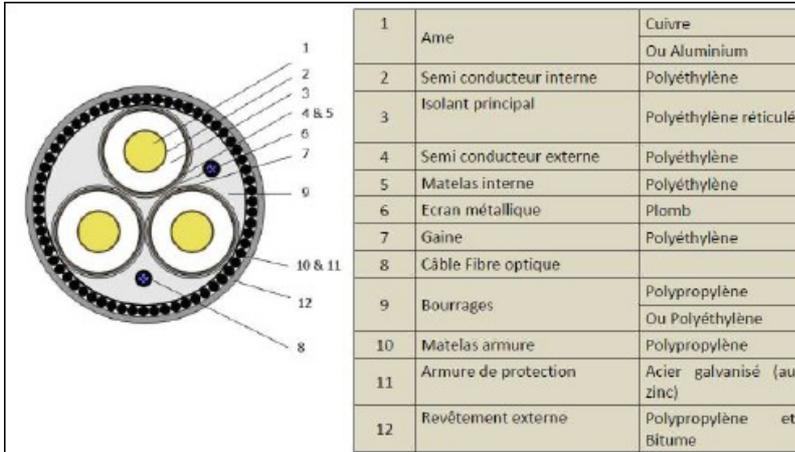


Illustration 7: Schéma des câbles utilisés pour l'acheminement sous-marin

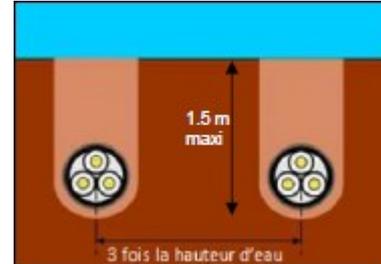


Illustration 8: Méthode d'ensouillage des câbles

Une solution, qui est celle retenue pour le projet de Fécamp, est l'utilisation de câbles composés de 3 conducteurs électriques et de câbles en fibre optique, insérés par une armature et une gaine de protection. Chacun des conducteurs électriques est composé d'un câble de cuivre, entouré d'isolant et d'écran de protection. Ces câbles seraient déposés dans des tranchées d'1,5 m de profondeur creusées dans les fonds marins. Dans les cas où le sol serait rocheux et donc impossible à creuser, la solution retenue est de poser le câble directement sur le sol marin, puis de le protéger par enrochement.

Le gestionnaire du réseau de transport (RTE) estime à 1,2 milliard d'euros le prix du raccordement entre tous les projets de parcs éolien en France et la terre selon Usine Nouvelle. Ces projets sont: Fécamp (Seine-Maritime), Courseulles (Calvados), Guérande (Loire-Atlantique), Saint-Brieuc (Côtes-D'Armor), Yeu-Noirmoutier (Vendée) et Dieppe-Le Tréport (Seine-Maritime)⁹. Le coût peut être expliqué par les matériaux, mais aussi par les travaux qui commenceront, dans le meilleur des cas, en 2017-2018 pour s'achever en 2020-2021, et les bateaux de pose (inexistants en France) sont en location au prix de 150 000 à 300 000 euros/jour.

Cependant un autre problème subsiste: est-il "possible de raccorder au système électrique terrestre des parcs éoliens offshore, via un réseau offshore à courant continu" ? C'est la question à laquelle répond industrie-techno.com¹⁰.

En effet, les liaisons marines sont traversées par un courant continu tandis que celles sur le sol terrestre transportent un courant alternatif.

⁹<http://www.usinenouvelle.com/article/les-defis-du-raccordement-pour-rte-dans-l-eolien-offshore.N397832>

¹⁰<https://www.industrie-techno.com/du-courant-continu-pour-l-eolien-offshore-avec-le-projet-twinties.27463>

Les recherches du projet Twenties¹¹ ont pour but de résoudre ce problème. Aujourd'hui, on sait comment convertir un courant continu en courant alternatif pour le raccordement électrique de la mer vers la terre.

Sur terre, le courant alternatif est privilégié. En effet, la perte d'énergie par effet Joule est moins importante car l'intensité du courant alternatif est moins importante.

Dans le cas de longs câbles sous-marins, comme c'est le cas pour acheminer l'électricité produite par les éoliennes offshore, le courant alternatif est le plus utilisé car le transport du courant alternatif implique toutefois des inconvénients: les câbles parallèles qui transportent ce courant interagissent entre eux. Ce phénomène est faible dans les lignes hautes tension qui traversent les longs champs de nos campagnes car les câbles sont suffisamment espacés entre eux. Or ce n'est pas le cas des câbles sous marins dont l'espacement est quasi nul. Si le courant est continu, alors, le champ magnétique, constant, n'induit plus aucun courant¹².

Il faut également faire la transition entre câbles marins et terrestres, ceux-ci étant différents. Afin de résoudre ce problème, il est nécessaire de construire une chambre de jonction afin d'effectuer ce raccordement. Celle-ci sera en général enfouie afin de ne pas gêner la vue et accessible uniquement des techniciens.

Transmettre l'énergie de la mer vers la terre est une chose, mais la stocker en est une autre. En effet, nous ne consommons pas l'énergie produite immédiatement, et en cas de surproduction des éoliennes, il faut pouvoir stocker cette énergie produite pour ne pas la "jeter". Nous pouvons prendre l'exemple de l'île Ta'u. La particularité de cette île est que son énergie provient à 100% de l'énergie solaire. En effet, l'île est complètement autonome et peut tenir 3 jours sans aucun rayon de soleil. Cela est dû aux 60 batteries PowerPack par Tesla qui peuvent stocker l'énergie électrique produite par les 5328 panneaux solaires.

Le stockage par batterie, qui peut sembler le plus évident est cependant très cher et ne peut donc pas être utilisé à plus grande échelle, lorsque l'on parle de fournir de l'énergie à tout un pays comme la France.

Il est toutefois possible d'imaginer un système de stockage par batterie non centralisé, c'est-à-dire que le stockage ne consistera pas en une seule énorme batterie mais en plusieurs petites, disséminées partout sur le territoire, ce qui, en plus de réduire les coûts car cela nécessite des batteries de moindre capacité, permet d'anticiper l'acheminement de l'électricité à travers tout le réseau.

Le stockage étant cher, quel qu'il soit, diverses techniques ont été élaborées par EDF lors des surproductions d'énergie la nuit par exemple:

Premièrement, une solution toute simple est la baisse du coût de l'électricité durant la nuit afin d'inciter le consommateur à programmer le lave vaisselle, linge recharger les batteries... la nuit.

Deuxièmement, la vente de l'énergie produite en surplus, à nos voisins rapporte de l'argent, plutôt que de la stocker. Il faut faire attention au fait qu'il est nécessaire tout de même de ne pas revendre toute l'énergie produite, pour en garder en stock.

Troisièmement, puisqu'il faut avoir de l'énergie en réserve, il faut stocker la nuit de l'énergie en grosse quantité grâce aux STEP (Stations de Transfert d'Énergie par Pompage-turbinage), et la restituer le jour¹³.

Dans le cadre des projets en mer du nord, un concept d'île artificielle utilisée dans une optique de stockage de l'énergie a été déposé. Cette île disposerait d'un grand puit de 30m en son centre. Lorsque les éoliennes seraient en sous-production, ce puits se remplirait en

11<https://www.industrie-techno.com/du-courant-continu-pour-l-eolien-offshore-avec-le-projet-twenties.27463>

12http://www.tsisoa.com/spip/IMG/pdf/done_20090107_173713_pls-2008-novembre_373-regards-idees_de_physique-pls_373_p152154.pdf

13<http://www.sortirdunucleaire.org/Le-stockage-de-l-energie-en-masse-existe-depuis>

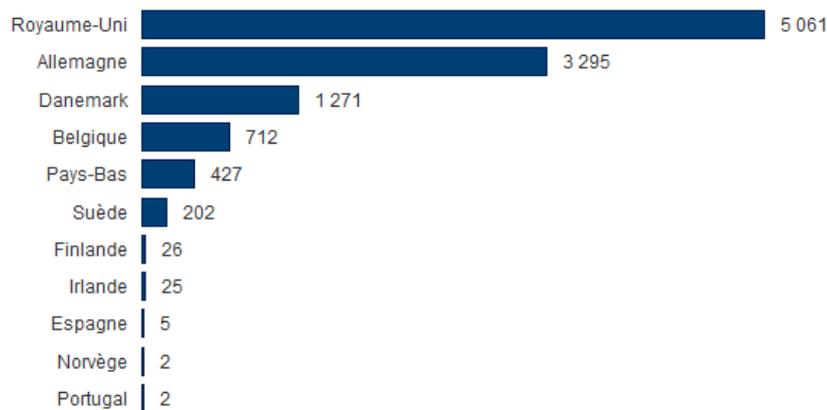
entraînant des turbines qui généreraient de l'électricité pour compenser la sous-production des éoliennes. Dans le cas où la production serait excédentaire, le surplus d'électricité produit par les éoliennes serait utilisé pour pomper l'eau hors du puit. Un tel dispositif permettrait de lisser la courbe d'apport d'électricité au réseau et donc de mieux prévoir les apports des parcs éoliens.

Nous en terminons donc ici pour l'aspect technique de l'éolien off-shore. On remarque donc que la technologie est présente et utilisable, même si elle pourrait être améliorée, notamment dans le domaine du stockage de l'énergie. Malgré cela, l'éolien off-shore est parfaitement viable pour des déploiements à plus grande échelle que pour de simples expérimentations. Nous allons d'ailleurs aborder de tels déploiements dans les paragraphes à venir.

5. PROJETS DE PARCS ÉOLIENS OFFSHORE :

5.1. État des lieux en Europe et dans le Monde:

Contrairement à la France, d'autres grands pays d'Europe ont pris de l'avance en termes de parcs d'éoliennes en mer. Nous allons donc faire un état des lieux dans le Monde et plus particulièrement en Europe. En effet, la très grande majorité des parcs éoliens offshore construits et en projet se trouvent en Europe. L'Angleterre, l'Allemagne, le Danemark, les Pays-Bas, la Belgique ou encore la Suède ont déjà construit plusieurs parcs éoliens maritimes.



Source: [Ewea European Offshore Statistics](#) [Récupérez les données](#)

Créé avec [Datawrapper](#)

Illustration 9: Puissance installée à fin 2015 en Europe (MW)

En effet, 82 parcs éoliens en mer étaient déjà opérationnels fin 2015 dans 11 pays européens et 7 autres ont été inaugurés en 2016. Cela représente pour le moment une puissance totale d'environ 12 GW pour un total de 3 000 turbines opérationnelles. Cela reste cependant très loin des chiffres concernant l'éolien terrestre qui représentait fin 2014 une puissance de 120,6 GW. Le meilleur élève dans le secteur de l'éolien offshore est le Royaume-Uni avec environ 30 parcs d'éoliennes en mer pour une puissance totale de 5 GW, seulement pour ce pays. En comparaison, l'Allemagne, deuxième puissance mondiale dans le secteur, détient 20 parcs pour 3,3 GW. La croissance dans ce domaine est exponentielle. En effet, en l'espace de 5 ans, on est passé d'une puissance totale de 3 GW à 12 GW. En ce qui concerne les perspectives futures, les experts du domaine espèrent atteindre en 2020 un parc mondial ayant une puissance de 40 GW.¹⁴

Dans le reste du Monde, l'éolien offshore peine à se développer. Aux États-Unis, un seul parc a vu le jour pour le moment, installé par l'entreprise Deepwater Wind. Il s'agit d'un parc constitué de 5 éoliennes, inaugurées en décembre 2016 au large de Rhode Island. Elles peuvent fournir un total de 30 MW d'électricité. Ce parc a connu des problèmes au lancement car avant même sa mise en service, un accident sur un générateur central d'une turbine, élément principal pour produire l'énergie, est apparu. Par ailleurs, Deepwater Wind

¹⁴ <http://www.emr-paysdelaloire.fr/actualites/en-europe-leolien-offshore-atteint-de-nouveaux-sommets/>

compte déjà proposer un autre projet de 15 éoliennes toujours dans la même zone côtière du pays.¹⁵

Par ailleurs, la Chine se développe de plus en plus dans le domaine de l'éolien. Elle possède aujourd'hui la moitié de la capacité mondiale mais surtout grâce à ses parcs d'éoliennes terrestres. Elle est cependant le seul concurrent de l'Europe en ce qui concerne les parcs maritimes avec 1 GW de puissance totale, l'Europe étant, comme dit précédemment, à 12 GW.

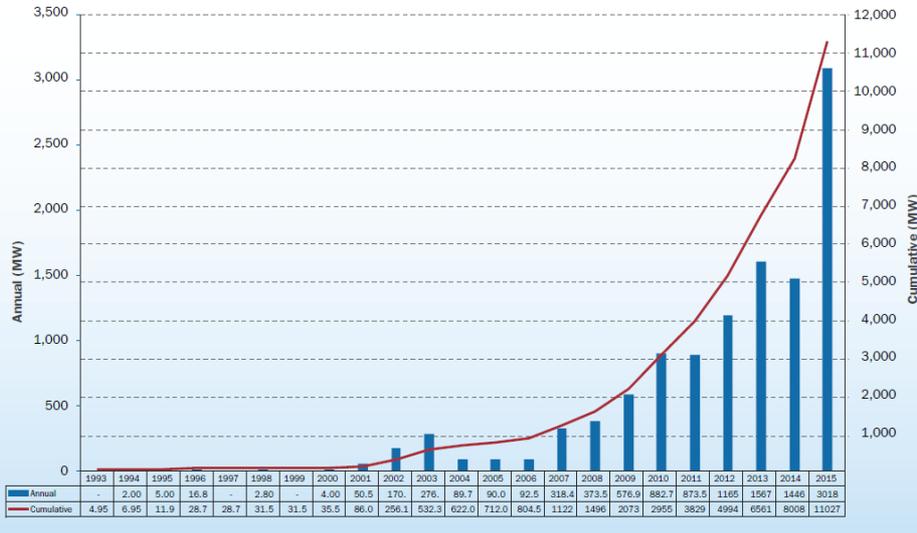


Illustration 10: Installations annuelles et cumulées d'éoliennes offshore (MW)

On remarque donc que l'éolien offshore ne cesse de se développer durant ces dernières années. Mais ce développement est assez hétérogène. Effectivement, l'Europe est presque le seul continent à posséder des parcs offshore. Seuls les Etats-Unis et la Chine tentent de se développer dans ce domaine. Enfin, au sein même de l'Europe, certains pays sont très en avance par rapport à d'autres. Le Royaume-Uni est largement en tête du classement tandis que des pays comme la France ne possèdent à ce jour aucun parc éolien offshore en service. Ce ne sont, pour le moment, que des projets, aucune construction n'est en cours en France.

5.2. Exemple de parc éolien au large des côtes britanniques :

Le bon élève britannique possède le plus grand parc d'éoliennes offshore en service au monde. Il s'agit du projet London Array, inauguré le 4 juillet 2013 et ayant débuté en 2001.

Ce parc comporte 173 turbines qui peuvent alimenter environ 490 000 foyers. La puissance totale est d'environ 630 MW, mais cela représente tout de même 370 MW de moins que ce qui était initialement prévu. Le projet a coûté environ 2,5 milliards d'euros au lieu des 1,8 milliards d'euros prévus. Le parc est situé à 20 km de l'estuaire de la Tamise, dans la Manche. En 2014, la production annuelle a atteint 2,2 TWh et en 2015 cette production a doublé pour atteindre les 5 TWh.

¹⁵<http://www.numerama.com/sciences/216533-rhode-island-inaugure-le-premier-parc-eolien-offshore-des-etats-unis.html>

Ces turbines Siemens sont réparties sur environ 100 km², dans des eaux de 25 m de profondeur de moyenne. Pas moins de 200 km de câble ont été déployés pour raccorder les éoliennes aux deux stations de transformation électrique offshore puis à la terre ferme. Ces stations ont été installées pour amener l'électricité vers la ville de Cleeve Hill, dans le Kent, et l'injecter dans le réseau avec une tension de 400 kV.



Illustration 11: Station de transformation offshore

Les câbles de réseau ont été installés grâce à des navires spécialisés et des véhicules pilotés à distance (des robots sous-marin qui étaient contrôlés de la surface). En ce qui concerne les câbles reliant les stations offshore à celles onshore, quatre câbles ont été mis en place. Ceux-ci ont été enterrés dans des tranchées creusées dans les fonds marins. Une collaboration a dû se faire entre les constructeurs et les collectivités locales afin de minimiser les nuisances sur les activités maritimes de la zone. Un tracé sur le sol marin a été fait en amont à l'aide d'un grappin (ancre modifiée) pour faciliter l'installation des câbles.

Ce parc a pourtant failli ne jamais voir le jour à cause de divers problèmes liés au financement de ce projet. En effet, trois entreprises s'étaient positionnées au départ pour financer ce projet.

Il s'agit de Shell Royal Dutch, E.ON UK Renewables et Dong Energy. Mais en juillet 2008, Shell s'est retiré lorsqu'une étude a montré que les garanties de rendement ne correspondraient pas à l'investissement consenti. Cependant, les deux autres investisseurs ont accepté de reprendre les 33 % de Shell pour finaliser le financement du projet. Les travaux en mer ont donc commencé en mars 2011 seulement. Puis en 2013, l'entreprise Masdar a repris une partie du financement du projet, et enfin en 2014, la Caisse de dépôt et placement du Québec a aussi investi. Au final, on obtient la répartition suivante des différentes parts : 25 % pour Dong Energy, 25 % pour La Caisse de dépôt et placement du Québec, 20 % pour Masdar et enfin 30 % pour E.ON UK Renewables.¹⁶

Chaque éolienne a été posée en deux jours, en moyenne, mais certaines ont pu être installées en seulement 12 heures grâce à des conditions climatiques parfaites. Pas moins de 1 000 employés et de 60 navires ont été mobilisés pour construire le plus grand parc d'éoliennes offshore jamais construit à ce jour.

Chaque éolienne est constituée d'un tube de 68 m de long, enfoncé dans le sol marin. La cabine de l'éolienne culmine à 87 m au-dessus de la mer. Le rotor est constitué de trois pales verticales pour un diamètre total de 120 m, donc la hauteur maximale de l'éolienne est de 147 m au-dessus du niveau de la mer. Chaque éolienne pèse environ 650 tonnes.

16 <http://www.energiesdelamer.eu/publications/1566-62relance-du-projet-eolien-london-array>

Ce n'est qu'à partir d'un vent de 4 m/s que les éoliennes commencent à fonctionner, sachant qu'il faut atteindre un vent de 13 m/s pour obtenir la production maximale. Enfin, pour des raisons de sécurité, les pales arrêtent de tourner à partir d'un vent supérieur à 25 m/s.¹⁷



Illustration 12: Vu du parc de London Array

En termes d'amélioration sur l'environnement, ce parc doit permettre de réduire les émissions de CO₂ du Royaume-Uni aux alentours de 925 000 tonnes par an.

En ce qui concerne la phase 2 du projet, elle prévoyait d'agrandir le parc qui produit déjà 630 MW en ajoutant 240 MW. Mais celle-ci a été abandonnée principalement à cause d'une étude faite sur les risques écologiques. En effet, cette étude a montré que la zone prévue pour construire la suite du plus grand parc éolien offshore du monde est très fréquentée par des oiseaux marins, les plongeurs à gorge rouge ou plongeurs catmarins, qui est une espèce en déclin au large des côtes britanniques. L'extension a aussi été abandonnée à cause d'un problème financier car le gouvernement britannique a annoncé qu'en 2020 le coût de production des éoliennes marines ne devra pas dépasser 121 € par MWh au lieu de 178 € aujourd'hui, ce qui freine les investisseurs.¹⁸

Malgré les nombreuses difficultés rencontrées pour aboutir au projet, le parc de London Array constitue une grande avancée dans le domaine des énergies offshore et est encore aujourd'hui le plus grand parc éolien offshore au monde.

5.3. État des lieux en France :

Le développement de l'éolien offshore en France semble en panne de vitesse depuis plusieurs années. De nombreux projets ont été envisagés mais aucun aujourd'hui n'est en construction.

Six principaux projets de parcs d'éoliennes offshore ont pour le moment été planifiés mais seulement trois ont reçu le feu vert administratif. Cependant les travaux n'ont pas

¹⁷ <http://www.londonarray.com/>

¹⁸ <http://www.windpoweroffshore.com/article/1281530/london-array-phase-2-extension-scrapped>

commencé, sans cesse retardés à cause de nombreux conflits entre différentes parties prenantes.

Les six projets français sont situés à :

- Saint-Nazaire : il s'agit de l'un des premiers appels d'offres retenus en 2011, toujours en attente d'autorisation. Le parc serait constitué de 80 éoliennes pour une puissance totale de 480 MW, installé à 12 km des côtes et pourrait couvrir la consommation de 720 000 habitants. Chaque éolienne produirait 6 MW. Ce chantier est estimé à 2 milliards €. Au départ prévu pour 2020, il est pour le moment repoussé à 2021 voire 2022, à cause de recours administratifs ou judiciaires. En effet, le collectif « Défense de la mer » conteste le choix de la zone, lieu de grande biodiversité et zone où vivent des oiseaux menacés. La cour, qui a été saisie et qui a examiné le recours, doit rendre sa décision d'ici fin mai ou début juin 2017.
- Fécamp : le champ éolien de Fécamp est sensé accueillir 83 éoliennes, installées à 13 km des côtes et produisant 498 MW. Ce parc pourrait couvrir l'équivalent de la consommation en électricité de plus de 770 000 personnes.
- Courseulles-sur-mer : le parc serait situé à 10 km des côtes, proche de certaines plages du Débarquement. Pour un total de 75 éoliennes, le parc développerait une capacité de 450 MW. Il pourrait alimenter 630 000 habitants. Plusieurs recours freinent cependant le projet. Un est lié à l'incompatibilité du parc avec le classement Unesco des plages du Débarquement. L'autre est lié à la menace possible sur la biodiversité et sur les activités maritimes.
- Saint-Brieuc : ce parc serait, quant à lui, situé à 16 km des côtes et compterait 62 éoliennes. Nous allons par la suite expliciter plus en détail ce projet qui semble être celui qui est le plus susceptible de se construire en premier en France.
- Le Tréport : le parc serait situé au large des côtes normandes, plus précisément à 16 km de Dieppe et 15 km du Tréport. Il prévoit l'installation de 62 éoliennes, chacune d'une puissance de 8 MW, sur 91,5 km², avec des fonds marins entre 5 et 25 m de profondeur. Avec une puissance totale de 496 MW, le parc devrait produire l'équivalent de la consommation électrique d'environ 850 000 personnes. Les travaux sont prévus pour 2019, pour une mise en service en juillet 2021. Trois entreprises se partagent le projet : Engie (47 %), EDP Renewables (43 %) et Groupe Caisse des Dépôts (10 %). Tandis que l'entreprise Adwen est en charge de la fabrication des éoliennes.
- îles d'Yeu et Noirmoutier : ce champ prévoit l'installation de 62 éoliennes, sur une surface de 82 km² pour une puissance totale de 496 MW, soit la consommation de 790 000 personnes. Il sera situé à 11.6 km de l'Île d'Yeu et à 16.5 km de Noirmoutier, dans une zone avec des fonds marins entre 17 et 35 m de profondeur. Le projet est porté par les mêmes entreprises que celui du Tréport.

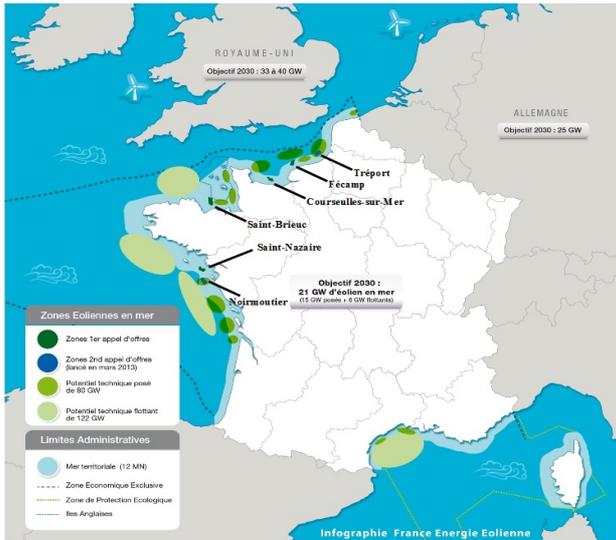


Illustration 13: Implantation des différents projets en France

En ce qui concerne les constructeurs, EDF Energies Nouvelles a remporté 3 des appels d'offre. L'entreprise est donc en charge des projets de Saint Nazaire, de Courseulles-sur-mer et de Fécamp. Ces parcs devaient au départ être prévus pour 2020 mais EDF a annoncé récemment qu'il faudrait plutôt attendre 2021 ou même 2022 pour avoir des parcs fonctionnels. Tous ces retards sont principalement dus aux nombreux recours déposés contre ces projets qui auraient un impact négatif sur l'environnement et la biodiversité. Avec 238 éoliennes, ces trois parcs représenteront au total une capacité de 1428 MW soit l'équivalent de la consommation électrique de plus de 2 millions d'habitants.

5.4. Exemple de parc éolien au large des côtes françaises :

Nous allons maintenant expliciter un projet en France qui semble être sur la bonne voie pour enfin voir le jour dans quelques années. En effet, le projet de la baie de Saint-Brieuc a obtenu le feu vert administratif, le jeudi 20 avril 2017. Trois autorisations étaient nécessaires pour approuver le projet :

- La concession d'utilisation du domaine public maritime
- L'autorisation unique pour les installations ouvrages travaux et activités
- L'approbation du projet d'ouvrage privé.¹⁹

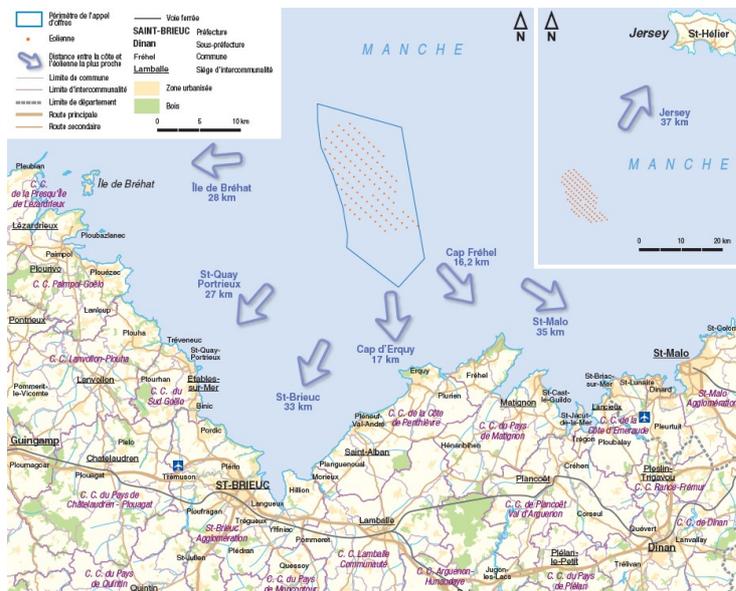


Illustration 14: Implantation du parc de Saint-Brieuc

Il s'agit d'un des tous premiers projets en France à obtenir toutes les autorisations nécessaires pour enfin être construit. Ce projet a une très grande importance pour l'avenir de la région bretonne en termes d'électricité, région en déficit ces dernières années.

Ce parc pourra fournir une capacité de 496 MW grâce à 62 turbines à 16 km des côtes. Cette puissance pourra alimenter environ une population de 850 000 habitants. Ce projet est évalué à 2,5 milliards d'euros. Sa mise en service est prévue pour 2020. Le début des travaux en mer est prévu pour 2018. Le

¹⁹ <http://www.media-web.fr/feu-vert-administratif-pour-le-parc-eolien-au-large-de-saint-brieuc-80-102-2532.html>

champ éolien devrait permettre la création de 2 000 emplois. L'appel d'offre a été remporté par la société Ailes Marines SAS, en avril 2012.

Chaque éolienne aura une puissance unitaire de 8 MW. Elles auront une hauteur de 216 m au-dessus du niveau de la mer et seront constituées de 3 pales verticales. Chaque mât d'éolienne sera posé sur une fondation de type jacket (treillis métalliques) qui est une solution réfléchie avec les instances de pêche, favorables avec ce type de fondations, et dont la structure en acier est recyclable. Chaque éolienne sera reliée à une sous-station électrique à travers des câbles électriques enfouis dans le sol marin, de tension égale à 66 kV. Cette sous-station électrique collecte l'énergie des éoliennes et élève la tension électrique grâce à des transformateurs de puissance. Enfin, la station sera reliée à la terre grâce à des câbles de 250 kV.²⁰

Comme la majorité des projets français, celui de Saint-Brieuc a dû faire face à de nombreuses critiques liées aux impacts possibles de ce parc sur l'environnement. En effet, pour certains, il provoquerait des nuisances visuelles, sur les fonds marins et aussi sur les activités maritimes de la zone. Mais cette fois, le parc va pouvoir se construire, en ayant obtenu toutes les autorisations administratives nécessaires.

20 <http://www.eolienoffshoresaintbrieuc.com/fr/accueil>

6. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Au total, plus d'une vingtaine de projets sont envisagés sur les quatre façades maritimes françaises. D'ici 2020, 6 000 MW d'éoliennes offshore devraient être installés en France selon les objectifs du Grenelle Environnement. En janvier 2013, le ministère en charge de l'énergie a lancé un second appel d'offres de 1 000 MW pour compléter le 1^{er} appel d'offres.

L'éolien offshore est donc un domaine en plein essor. Les projets déjà concrétisés à l'étranger, notamment en Allemagne et au Royaume-Uni montrent qu'il s'agit d'une option de génération d'électricité viable, cependant, il est encore trop tôt pour parler d'un développement industriel pour cette technologie, comme en témoignent le temps nécessaire à l'approbation et à la mise en route des projets en France.

Malgré cela, le potentiel de cette technologie est largement suffisant pour envisager un développement bien plus important à l'avenir. Mais un tel développement nécessitera de nouvelles innovations technologiques afin d'optimiser et d'agrandir les installations, il sera notamment nécessaire d'améliorer l'installation et l'acheminement de l'électricité pour des parcs plus loin de la côte où il serait possible de construire des parcs plus grands.

Outre les innovations technologiques, il est également nécessaire à présent d'étudier les effets de ces parcs sur la faune et la flore marines afin de s'assurer qu'ils n'ont aucun effet néfaste sur celles-ci.

L'éolien offshore est donc actuellement à un stade semi-industriel, si l'utilité et la capacité génératrice de cette technologie sont déjà avérés, il est nécessaire de résoudre certains problèmes, techniques et environnementaux, avant d'envisager un déploiement à très grande échelle.

Malgré ces quelques problèmes, l'éolien offshore est une technologie d'avenir et nul doute qu'elle fera un jour partie intégrante de la production électrique française.

7. BIBLIOGRAPHIE

<http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/cop21-conference-sur-le-climat-de-paris>

<http://www.lefigaro.fr/sciences/2016/04/22/01008-20160422ARTFIG00325-cop21-un-nombre-record-de-pays-signe-l-accord-a-l-onu.php>

<http://www.europe1.fr/emissions/le-vrai-faux-de-l-info2/combien-couterait-le-prolongement-de-la-duree-de-vie-des-58-reacteurs-nucleaires-2989880>

<https://www.edf.fr/groupe-edf/producteur-industriel/nucleaire/atouts/emissions-de-co-sub-2-sub>

<https://www.lesechos.fr/elections/presidentielle-2017/0211874723519-la-sortie-du-nucleaire-couterait-217-milliards-deuros-2071882.php>

<http://stop.eolien.offshore.free.fr/>

<http://www.usinenouvelle.com/article/les-defis-du-raccordement-pour-rte-dans-l-eolien-offshore.N397832>

<https://www.industrie-techno.com/du-courant-continu-pour-l-eolien-offshore-avec-le-projet-twenties.27463>

<https://www.industrie-techno.com/du-courant-continu-pour-l-eolien-offshore-avec-le-projet-twenties.27463>

http://www.tsisoa.com/spip/IMG/pdf/_done_20090107_173713_pls-2008-novembre_373-regards-idees_de_physique-pls_373_p152154.pdf

<http://www.sortirdunucleaire.org/Le-stockage-de-l-energie-en-masse-existe-depuis>

<http://www.emr-paysdelaloire.fr/actualites/en-europe-leolien-offshore-atteint-de-nouveaux-sommets/>

<http://www.energiesdelamer.eu/publications/1566-62relance-du-projet-eolien-london-array>

<http://www.londonarray.com/>

<http://www.windpoweroffshore.com/article/1281530/london-array-phase-2-extension-scraped>

<http://www.media-web.fr/feu-vert-administratif-pour-le-parc-eolien-au-large-de-saint-brieuc-80-102-2532.html>

<http://www.eolienoffshoresaintbrieuc.com/fr/accueil>