



Date de remise du rapport : **23/06/09**

Référence du projet : **STPI/P6-3/2009 – 039**

Intitulé du projet : **Les parcs éoliens offshore : exemple du projet Français situé en Haute Normandie.**

Type de projet : **Documentation / Bibliographie**

Objectifs du projet (10 lignes maxi) :

L'objectif de notre projet était d'étudier la réalisation d'un parc éolien offshore en Haute Normandie en prenant en compte les aspects techniques, socio-économiques, politiques et environnementaux. Pour ce faire, il nous fallait faire une comparaison entre un parc éolien terrestre et un parc éolien offshore, puis utiliser cette généralisation pour expliquer le fonctionnement des parcs éoliens situés en Haute Normandie et plus précisément celui du site de la Côte d'Albâtre.

Avec la disparition progressive des énergies fossiles nous nous intéresserons finalement aux spécificités qui font de l'énergie éolienne offshore une source d'énergie d'avenir.

Si existant, n° cahier de laboratoire associé : **Compte rendu et carnet de bord de chaque séance.**

## TABLE DES MATIERES

1. INTRODUCTION .....	5
2. Méthodologie / Organisation du travail .....	6
3. Généralités sur les éoliennes et les parcs éoliens offshore .....	7
3.1. Fonctionnement des éoliennes.....	7
3.2. Composantes.....	7
3.3. Puissance et productivité .....	8
4. Le montage d'un projet eolien offshore .....	11
4.1. Etude d'impact .....	11
4.1.1. Notion d'étude d'impact.....	11
4.1.2. Critères d'étude d'impact d'un projet éolien terrestre.....	11
4.1.3. Critères d'étude d'impact d'un projet éolien offshore .....	13
4.1.4. Exemple de la Côte d'Albâtre .....	14
4.2. Etude de faisabilité et pré-diagnostic.....	15
4.2.1. Cas d'un parc éolien terrestre .....	15
4.2.2. Contexte du développement de l'éolien offshore .....	15
4.2.3. Technologies.....	16
4.2.4. Retombées économiques et sociales .....	17
5. Réalisation d'un parc éolien offshore .....	19
5.1. Complexité d'un projet offshore.....	19
5.2. Types de structures.....	20
5.2.1. Gravity Base .....	20
5.2.2. Monopile .....	20
5.2.3. Tripod.....	21
5.3. Acheminement de l'énergie .....	22
6. Maintenance du site de la cote d'albatre .....	23
6.1. Maintenance d'un parc éolien terrestre.....	23
6.1.1. Les aspects de la gestion du parc éolien.....	23
6.1.2. Les frais relatifs à la ferme éolienne .....	24
6.2. Maintenance d'un parc éolien offshore : Côte d'Albâtre.....	25
6.3. Démantèlement et bilan carbone.....	26

7.	Conclusions et perspectives.....	27
7.1.	Conclusion sur le travail réalisé:.....	27
7.2.	Conclusion sur l'apport personnel de cette U.V. Projet:.....	27
7.3.	Perspectives pour la poursuite de ce projet:.....	27
8.	Bibliographie .....	28
9.	Annexes (non obligatoire) .....	29

## 1. INTRODUCTION

Le développement incessant des activités humaines requiert de plus en plus d'énergie électrique et soulève aujourd'hui le problème de la dégradation de notre environnement et de la préservation de certaines ressources limitées.

C'est pourquoi il est nécessaire aujourd'hui de trouver des sources d'énergies propres comme la géothermie, le nucléaire, l'hydraulique ou encore l'éolien.

Nous nous sommes donc intéressés à l'énergie que l'on peut récupérer grâce au vent, l'énergie éolienne, et plus particulièrement à la source offshore de cette dernière. Nous avons commencé ce projet dans l'optique de comprendre les enjeux de l'énergie éolienne offshore, de la conception à la construction puis à l'exploitation, en s'intéressant plus précisément à l'exemple du parc offshore de la Côte d'Albâtre, en Haute Normandie.

Constitué de quatre personnes, notre groupe se réunit tous les mardi matin de 9h45 à 11h15 dans le laboratoire de physique au bâtiment D1. A l'aide de notre professeur M. J. ABDUL AZIZ, que nous remercions sincèrement, et de notre travail de documentation, nous avons compris qu'il faudrait également intégrer les aspects socio-économiques et technologiques à notre étude. Concevoir un projet éolien offshore dans son intégralité est en effet quelque chose de très global et très technique à la fois.

Ce projet peut ainsi être considéré comme une introduction à la conception d'un projet éolien offshore à travers l'étude du cas de la Côte d'Albâtre.

## 2. METHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Au début du projet, nous avons tous commencé par effectuer des recherches assez larges afin d'avoir une idée générale sur notre sujet.

Une fois que l'on a pris connaissance du sujet et de ses différentes approches, à travers les sites internet trouvés, nous avons essayé de fixer nos objectifs pour mieux cerner le travail à réaliser et les buts à atteindre.

Sachant que notre sujet intitulé Les parcs éoliens offshore : Exemple du projet français situé en Haute Normandie relève plus d'un travail bibliographique et documentaire qu'expérimental, il nous a donc paru judicieux de débiter notre travail par l'établissement d'un premier plan général du corps de notre dossier.

A l'issue de nos concertations avec le professeur encadrant, il en est sorti que nous devons tout d'abord faire des recherches sur les parcs éoliens terrestres d'un côté, sur les parcs éoliens offshore de l'autre, puis de comparer les deux types de parcs et ensuite d'appliquer toutes les notions rencontrées à l'exemple du parc éolien offshore situé en Haute Normandie.

Après, nous avons réparti les différentes tâches au sein de notre groupe constitué de 4 étudiants ; chacun choisissant d'aborder la partie qui l'intéressait le plus.

A chaque séance, chacun des membres de notre groupe apportait les recherches effectuées et nous discutons des problèmes rencontrés entre nous tout en concertant le professeur encadrant.

Chacun d'entre nous informait les autres sur l'avancement de son travail et l'on se donnait des conseils mutuels.

A la fin de chaque séance, on faisait un résumé du travail effectué durant la séance ainsi que les objectifs à réaliser pour les prochaines séances, dans le compte rendu hebdomadaire que l'on remettait au professeur.

Le tableau suivant montre la répartition des différentes tâches au sein des membres de notre groupe.

AZMAN Anuar	Objectifs Etude de faisabilité et pré diagnostique
IDEBDOU Meriem	Méthodologie Etude d'impact
LOUIS Florian	Réalisation d'un parc éolien offshore Introduction
MARIN Vlad	Généralités sur un parc éolien offshore

### 3. GENERALITES SUR LES EOLIENNES ET LES PARCS EOLIENS OFFSHORES

#### 3.1. Fonctionnement des éoliennes

Le fonctionnement d'une éolienne reste toujours relativement simple. Pour faire marcher une éolienne on a besoin du vent. Celui ci est engendré par une différence de température ou de pression. Il est ralenti par les obstacles et la rugosité du sol. En général, plus on monte en altitude, plus on a accès à des vents plus forts. Les aussi plaines ont des vents forts parce qu'il y a peu d'obstacles (faible rugosité). Les cols de montagne ont eux aussi des vents forts, parce qu'ils canalisent les vents de haute altitude (par le principe de l'équation Bernoulli).

Le vent entraîne les pales d'éolienne, qui mettent en mouvement un arbre principal. A son tour, l'arbre met en marche un moteur électrique typique avec un alternateur. Ce lui la, transforme l'énergie mécanique de l'arbre, en énergie électrique.

#### 3.2. Composantes

Les principales composantes d'une éolienne sont :

- Une fondation**, qui permet de fixer de façon rigide l'ensemble de la structure de l'éolienne;
- Un mât** qui permet de placer le rotor à une hauteur suffisante pour lui permettre d'être entraîné par un vent plus fort et régulier qu'au niveau du sol ;
- Un rotor**, composé de plusieurs pales (en général trois). Le rotor est relié à la nacelle par le moyeu ;
- Une nacelle** montée au sommet du mât, abritant les composants nécessaires au fonctionnement de la machine.

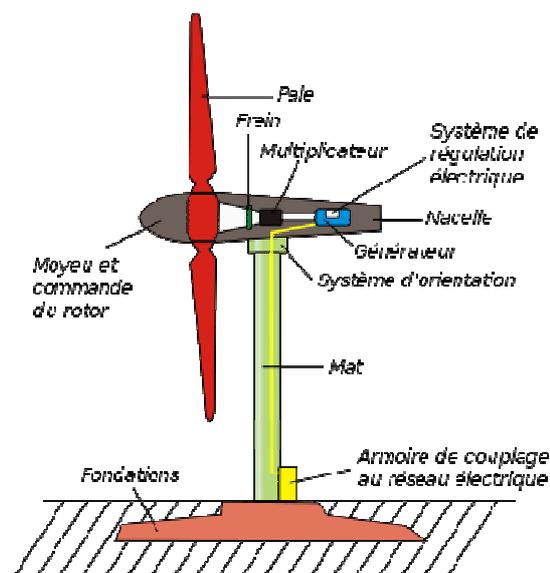
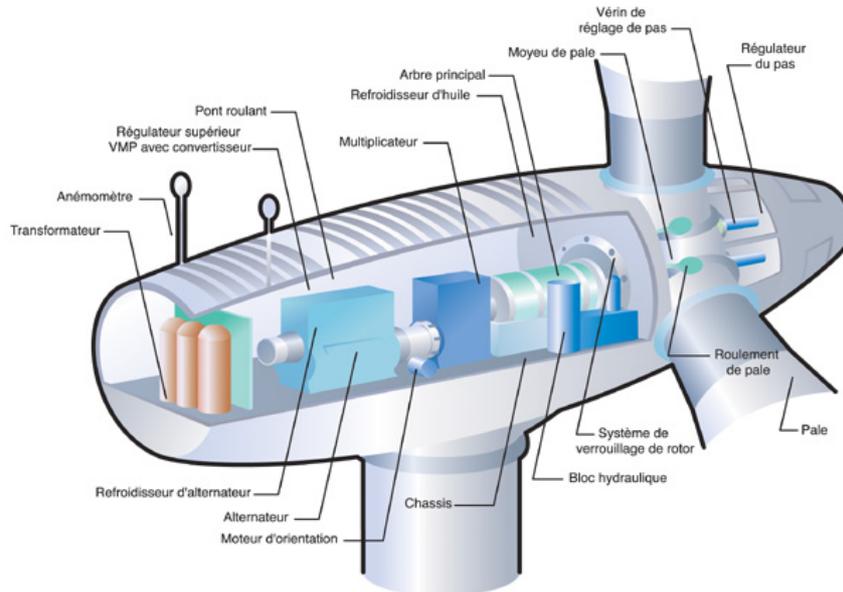


figure 1 : composantes éolienne

### Schéma type d'une architecture de nacelle



**figure 2 : composantes nacelle**

A part de ces composantes principales de l'éolienne, il y a d'autres parties du moteur qui lui assurent le bon fonctionnement et qui se trouvent dans la nacelle : un système de refroidissement de l'arbre et de l'alternateur; un groupe multiplicateur qui augmente la vitesse de rotation ; un régulateur de vitesse et un moteur qui assure l'orientation de la nacelle et ses pales en fonction de la direction du vent (suivant les données d'un anémomètre). Finalement pour des raisons de sécurité, il y a un système qui permet le blocage des pales en cas de vent trop fort ou d'un arrêt volontaire.<sup>[10]</sup>

D'autres nouvelles technologies installées au bord de la nacelle, permettent aujourd'hui de suivre les informations de son fonctionnement. Il est ainsi possible de modifier ce fonctionnement à distance, par le centre de contrôle (qui se trouve sur la terre dans le cas d'un parc offshore).

### 3.3. Puissance et productivité

Une éolienne se modélise principalement à partir de ses caractéristiques aérodynamique, mécanique et électrotechnique. En pratique, on distingue le « grand éolien », qui concerne les machines de plus de 250 kW, de l'éolien de moyenne puissance (entre 36 kW et 250 kW) et du petit éolien (inférieur à 36 kW). Dans le projet de Cote D'Albâtre, les éoliennes ont chacune une puissance de sortie de 5MW, elle étant donc dans la catégorie des grandes éoliennes.

On différencie les éoliennes aussi en fonction de leur taille. Les grandes éoliennes sont particulièrement appropriées à l'installation en mer. En effet on choisit d'abord la puissance de sortie que nous voulons avoir, qui implique une certaine surface balayée par les pales, d'où la taille d'une pale et finalement l'hauteur de l'éolienne.

Comme on peut le voir dans la figure ci-dessous, à chaque puissance correspond une certaine taille du diamètre du rotor. Par exemple, une éolienne, dont la puissance de la génératrice est de 300 kW, aura typiquement un diamètre de rotor d'environ 30 mètres. Si on double le diamètre du rotor, on obtiendrait une surface qui est quatre fois plus grande (c'est à dire 2<sup>2</sup>). Cela signifie également une augmentation de quatre fois de la puissance de sortie du rotor.

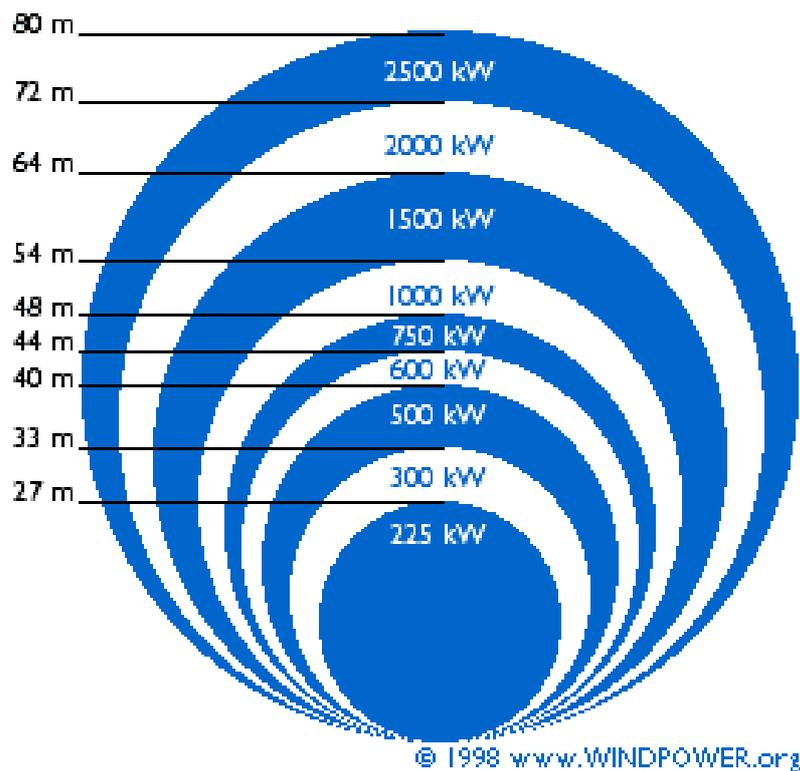


figure 3 : relation puissance - grandeur

Pour comprendre la puissance maximale produite par une éolienne, il faut d'abord s'intéresser à la puissance totale portée par le vent dans un cylindre de section S :

$$P_{cinétique} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3$$

eq. 1

Où  $\rho$  représente la masse volumique d'air,  $S$  la surface balayée par les pales en m<sup>2</sup> et  $V^3$  la vitesse incidente du vent en m/s.

Mais la récupération totale de cette puissance est impossible, car elle impliquera « l'arrêt complet du vent ». Lorsque les pales ont un certain profil, elles entraînent des importantes turbulences derrière eux. Les turbulences s'accumulent et produisent un effet de mur qui empêche le vent de continuer son déplacement dans la même direction. Cela produit deux effets en suite : premièrement, le vent ne peut plus continuer son écoulement naturel dans la zone, le parc éolien étant responsable d'une faible modification climatique locale ; et deuxièmes, les turbulences derrière les pales (dans la zone de la nacelle et juste après cela) produisent une baisse de rendement de l'éolienne car ils laissent pas le vent qui arrive passer les pales avec la même vitesse. Suite a des études on pu donc trouver le bon profil des pales et l'expression de la puissance récupérable par l'éolienne. Cette puissance est donc inférieure a cela maximale du vent. Albert Betz a démontré que la puissance maximale récupérable est :

$$P_{max} = \frac{16}{27} \cdot P_{cinétique} = \frac{8}{27} \rho \cdot S \cdot V^3$$

eq. 2

Le rendement maximal théorique d'une éolienne est ainsi fixé à environ 59,3 %. Ce chiffre ne prend pas en compte les pertes d'énergie occasionnelles lors de la conversion de l'énergie mécanique du vent en énergie électrique.

Les conditions optimales pour chaque éolienne (correspondants a des certaines vitesses du vent) permettent d'atteindre leur rendement maximal. En dessous de cette vitesse, les éoliennes produisent moins d'énergie, au dessus, les éoliennes sont mises à l'arrêt.

## 4. LE MONTAGE D'UN PROJET EOLIEN OFFSHORE

### 4.1. Etude d'impact

L'implantation d'un parc éolien offshore en France requiert de suivre, dans le cas le plus général, **une procédure réglementaire** dont l'une des principales instructions est la constitution d'un dossier contenant notamment **une étude d'impact**.

#### 4.1.1. Notion d'étude d'impact

Une **étude d'impact** est une étude qui vise à apprécier les conséquences environnementales d'un projet pour en limiter les impacts négatifs.

En d'autres termes, l'étude d'impact est une analyse scientifique et technique qui doit permettre d'envisager globalement les conséquences futures d'un ouvrage sur l'environnement et d'identifier la solution la moins préjudiciable à cet égard.

C'est pourquoi elle s'appuie sur des études à caractère environnemental qui doivent être menées dans le cadre du choix du site et de l'élaboration du projet.

Cette étude enfin, doit porter sur l'ensemble du projet et concerner l'ensemble des phases prévues : phase de travaux, phase d'exploitation et phase de démantèlement.

Le contenu d'une étude d'impact, défini par le décret du 12 octobre 1977, est organisé en cinq chapitres et accompagné d'un résumé non technique.

#### 4.1.2. Critères d'étude d'impact d'un projet éolien terrestre

Les études d'impact préalables à la validation d'un projet de construction de fermes éoliennes terrestres permettent d'évaluer tous les impacts sur la santé humaine, la faune et la flore.

D'autre part, l'étude d'impact repose sur la concertation. En effet, un projet éolien concerne de nombreux acteurs, c'est pourquoi toutes les administrations concernées de l'Etat sont consultées ainsi que la Commission Départementale des sites, les associations et les collectivités locales d'implantation.

Tout d'abord, il est important de souligner que les projets éoliens sont soumis à deux types d'autorisation : l'une concernant l'autorisation de construire l'éolienne et l'autre concernant l'autorisation de produire de l'électricité.

##### **Conduite de l'étude<sup>[1]</sup> :**

Définie par le décret énoncé auparavant, l'étude d'impact doit comprendre :

- **Des éléments cartographiques** (les unités paysagères, les éléments de paysage remarquables connus, les monuments historiques, les sites

remarquables et protégés concernés, les parcs éoliens existants dans l'aire d'étude).

- **Des éléments d'appréciation de la sensibilité patrimoniale et paysagère** (description des structures paysagères, les perceptions sociales des paysages, les tendances d'évolution des paysages concernés).
- **Des éléments d'appréciation de la concordance de l'aire d'étude** avec la sensibilité patrimoniale et paysagère du territoire, notamment en termes de champs de visibilité.
- **Une liste des principales sources de données utilisées.**

Ainsi, la réalisation d'une étude d'impact requiert de suivre la démarche suivante dont les étapes sont résumées ci-dessous :

- Analyse de l'état initial du site et de son environnement.
- Analyse des effets directs ou indirects, temporaires ou permanents du projet sur l'environnement.
- Analyse des raisons pour lesquels du point de vue environnemental le projet a été retenu.
- Recherche des mesures qui seront prises par le porteur du projet pour dédommager les conséquences sur l'environnement et leur coût.
- Analyse des impacts cumulatifs c'est-à-dire des impacts avec les projets en construction, les parcs en activité...etc.

#### **Sécurité des éoliennes :**

Les études effectuées concernant la sécurité des éoliennes ont montré que la probabilité qu'un incident d'éolienne entraîne un accident de personnes reste faible. Par contre, la probabilité d'accident du travail lors de la construction du projet éolien, la maintenance ou l'exploitation est non négligeable.

#### **Milieux naturels :**

Les éoliennes, selon leur taille, vitesse de rotation et positionnement peuvent avoir un impact sur les oiseaux et chauve-souris.

La majorité des études menées ont montré que ces dernières sont très sensibles aux éoliennes. En revanche, le taux mortalité des oiseaux due aux collisions avec des éoliennes reste faible.

#### **Paysage :**

L'implantation d'un parc éolien sur un site modifie son environnement. En effet, celle-ci a un impact sur la valeur patrimoniale du site, qu'il soit artistique, original ou plus ordinaire. Il est donc important d'identifier les zones d'implantation du patrimoine culturel, afin de définir si l'implantation d'éoliennes est compatible avec la préservation de ce patrimoine.

#### **Bruit et santé publique :**

Même si les éoliennes de dernière génération sont relativement silencieuses, une étude de l'impact sonore sur les habitations est effectuée avant l'implantation des parcs éoliens. En fonction du résultat, cette implantation peut être modifiée afin de respecter la réglementation (émergence maximale de 5 dBA le jour et 3 dBA la nuit). La distance entre les éoliennes et les habitations est généralement de 300m. A 500m, elles sont inaudibles ou très peu audibles et leur bruit est généralement couvert par celui du vent.

#### 4.1.3. Critères d'étude d'impact d'un projet éolien offshore

L'étude d'impact d'un projet éolien offshore reprend l'ensemble des critères énoncés auparavant. Cependant, les études réalisées au niveau de l'environnement marin ont permis d'avancer les conclusions suivantes :

- ✚ Certaines espèces de mammifères sont sensibles aux sons produits par les éoliennes (ex : Marsouin, Phoque gris) ;
- ✚ Comme sur terre, les phases chantier et démantèlement sont potentiellement susceptibles d'engendrer le plus d'impact sur les mammifères marins : les sons diffusés lors du forage peuvent endommager l'oreille interne de certains mammifères. L'augmentation du trafic en bateaux peut avoir des effets sur le comportement de certaines espèces. Ainsi, le calendrier des travaux est donc à établir en prenant en compte les espèces les plus sensibles à ces effets.
- ✚ Pendant la phase d'exploitation des éoliennes, les sons liés à la rotation des pales, transmis par le mat et émis dans l'eau peut également agir sur le comportement de certaines espèces ; une distance d'éloignement de 500 mètres serait suffisante pour limiter ces effets.
- ✚ La création de récifs artificiels à la base des mats reste hypothétique.
- ✚ A la condition qu'elles soient implantées assez loin de la côte, les éoliennes en pleine mer entraînent moins d'impact sur le paysage terrestre
- ✚ Concernant les oiseaux, il convient d'évaluer les impacts en fonction des phases suivantes :
  - **Phase chantier** : le trafic engendré peut entraîner des collisions et déranger les nicheurs et les migrateurs. La période de travaux doit donc être finement étudiée en fonction des espèces d'oiseaux présentes localement ; la pollution liée aux hydrocarbures peut également entraîner une certaine mortalité ;
  - **Phase d'exploitation** : des dérangements, collisions et d'éventuelles pertes ou modifications d'habitat peuvent impacter les oiseaux.

#### **4.1.4. Exemple de la Côte d'Albâtre**

Le site du parc offshore de la Côte d'Albâtre se situe, à environ 7 km au large de Veulettes-sur-Mer (Seine-Maritime). Ce choix de site résulte d'une étude attentive des conditions techniques, économiques et environnementales, sans oublier les aspects concernant la sécurité et les conflits d'usage.

Le parc sera composé de 3 rangées de 7 éoliennes qui seront fixées à 23-27 mètres de profondeur et s'élèveront à 144 mètres de hauteur.

#### **Est-il possible de voir le parc depuis la plage ?**

Oui, lorsque la météo s'y prête. Néanmoins les éoliennes se trouveront relativement loin de la plage (à environ 6km). L'implantation retenue est le fruit d'un travail soigné sur le rendu visuel par une insertion paysagère intelligente. Plusieurs facteurs ont donc été combinés: Un parc éolien trop lointain perdrait de son attrait touristique, tandis qu'un parc trop proche en revanche nuirait au confort visuel des riverains.

#### **Sera-t-il possible d'entendre les éoliennes ?**

Non. Le parc sera bien trop loin de la côte pour que le vent porte le bruit. De plus, toutes les nouvelles technologies ont été utilisées pour disposer des éoliennes les plus silencieuses possibles.

#### **Le parc représentera-t-il un danger pour le trafic maritime ?**

Non. Les principaux chemins de navigations ont été identifiés et ne se trouvent pas du tout dans la zone retenue.

## **4.2. Etude de faisabilité et pré-diagnostic**

### **4.2.1. Cas d'un parc éolien terrestre**

Une part essentielle du projet est l'étude de faisabilité et le pré-diagnostic d'énergie éolienne en zones terrestre. Pour obtenir un précis lu sur le potentiel de ce projet, l'étude de faisabilité doit d'abord inclure l'analyse des vitesses du vent et de la densité d'air. Le rendement d'énergie éolienne est une fonction cubique de la vitesse du vent et de la densité d'air, ainsi le gain de ces données pour un secteur est crucial à comprendre le potentiel d'énergie éolienne du secteur.

Une étude de faisabilité doit également inclure des demandes législatives auprès de l'état et des niveaux locaux du gouvernement ; sans ces permissions, un projet de vent ne verra jamais la fructification. Sur une note semblable, l'étude de faisabilité doit adresser les grands défauts environnementaux et de développement. À cette partie, il est important de soumettre des demandes législatives, mais les permissions réelles peuvent prendre des mois à accorder. <sup>[2]</sup>

### **4.2.2. Contexte du développement de l'éolien offshore**

L'émergence de l'éolien en mer est due à la conjugaison de deux facteurs déterminants. Le premier tient à la qualité de la ressource éolienne en mer, tant en intensité qu'en persistance. La maturité de la technologie terrestre (taux de disponibilité de 98 %) a permis de franchir rapidement le pas vers des installations en mer (1991, parc de Vindeby au Danemark), moyennant des conditions favorables (faible profondeur d'eau, peu de houle, faible distance à la côte). Cette capacité met alors en perspective la possibilité d'installer un grand nombre de machines ayant une puissance unitaire forte (multi-mégawatt). Ces parcs peuvent donc présenter des puissances très importantes (plus de 100 MW). Le deuxième facteur est plus récent quant à lui, et tient à la raréfaction des espaces d'accueil pour de nouveaux parcs éoliens terrestres dans les pays comme l'Allemagne et le Danemark qui affichent respectivement fin 2001, 8 753 MW (exclusivement sur terre) et 2 417 MW de puissance installée.

La réalisation du site de la Côte d'Albâtre suscite beaucoup de questions d'un point de vue juridique et administratif. Pour arriver à déterminer qui allait faire quoi et comment parmi les différents services, la société ENERTRAG a mis six mois. Avec les différentes parties prenantes, ils ont dû résoudre beaucoup de problèmes administratifs qui ne s'étaient jamais posés. Au final, chacun de ces nombreux services (sous-préfecture, DDE, Affaires Maritimes, DRIRE, DIREN, Préfecture Maritime, DRAM...), a joué le jeu et apporté des réponses avec sa sensibilité

Envisager l'éolien offshore n'est pas assimilable à une « fuite vers le large » des parcs éoliens qui auraient des difficultés à se faire accepter des populations (nuisance visuelle principalement). Les sensibilités et les orientations des différents pays européens sont contrastées sur le sujet. L'éolien terrestre et l'éolien en mer sont des filières complémentaires de nature à définir le poids économique de l'éolien en matière de production d'électricité. A l'heure actuelle, les parcs terrestres produisent à des niveaux de prix acceptables et compétitifs (prise en compte des externalités). Les parcs en mer se décrivent sous la forme de potentialités.

### 4.2.3. Technologies

Les premiers parcs offshore ont d'abord utilisé des produits développés pour l'éolien terrestre. Ces machines ont donc été « marinisées » afin de résister aux conditions sévères du milieu marin (corrosion) et plus spécifiquement aux conditions de la Mer Baltique (résistance à la glace pour les fondations essentiellement). La puissance unitaire des machines est passée de 500 kW à 2 000 kW (Middelgrunden) et les constructeurs allemands et danois pour l'essentiel (Vestas, Nordex, Enron Wind, Enercon, Bonus, NEG-Micon, etc...) continuent leur course à la puissance, avec notamment une machine de 4,2 MW annoncée par Enercon (DE) pour 2003. Des dossiers de machines de 5 MW sont également en préparation en attendant que le marché confirme sa demande. <sup>[3]</sup>

Une des premières initiatives françaises portant sur la construction d'un parc éolien offshore revient à Espace Éolien Développement (EED) dans le cadre du programme Éole 2005, situé sur la Côte d'Albâtre. En référence aux installations terrestres, les conditions de développement de l'énergie éolienne en mer amènent un certain nombre de questions techniques nouvelles, parmi lesquelles on peut citer<sup>[1]</sup> :

- l'évaluation du **gisement** près des côtes. Les compétences dans le domaine du pétrole ont été développées en investiguant des zones de plus en plus profondes. Cependant le savoir-faire acquis dans l'exploitation des zones côtières peut faire l'objet d'un transfert des connaissances et des compétences techniques ;
- les **technologies** composant le système éolien sont à consolider en regard du nouvel objectif de production d'électricité en offshore. Les conditions et les contraintes d'exploitation changent d'ordre de grandeur. Le problème ne se réglera pas par simple homothétie. Cela touche aussi bien le volet unitaire (les pales, le rotor, l'ouvrage support...) que le système de production complet d'un champ d'éoliennes.
- les **chargements océano-météo** dus au couplage de la houle et du vent, et des courants sur la structure des éoliennes et l'environnement marin (corrosion et bio-salissures). Les parcs installés jusqu'alors ont bénéficié de zones favorables, car la bathymétrie – ou profondeur de l'eau - est faible (5 m) à une distance acceptable de la côte (1 à 6 km), avec très peu de marnage et enfin une houle de faible amplitude. Sur les façades maritimes de la Côte d'Albâtre, les conditions sont beaucoup plus sévères et les données techniques (profondeur, distance à la côte) à considérer avec beaucoup d'attention ;
- conséquence directe de ce qui vient d'être évoqué, les transports de l'énergie électrique (câble sous-marin) et les fondations à mettre en œuvre sont deux facteurs de **surcoût** à étudier de près pour rendre ces projets viables d'un point de vue économique ;
- **l'installation, l'exploitation et la maintenance** des parcs offshore prennent une autre dimension que sur terre. Les machines doivent être fiables, gérables à distance. Les opérations de maintenance se programment dans des conditions météorologiques clémentes. Tout cela est à planifier sur la durée d'exploitation qui doit être la plus longue possible. Cela sera expliquée en détail dans la partie « Installation d'un parc éolien offshore » ;
- l'usage de la mer à proximité des parcs demande une vigilance particulière, pour la **sécurité** des usagers et des installations.

#### 4.2.4. Retombées économiques et sociales

Economiquement, une vive interrogation subsiste sur le coût réel des parcs offshore. Il semble clair que les coûts d'investissement sont supérieures à la référence terrestre (700 à 1000 €/kW), mais une baisse notable de ceux-ci devrait être constatée : 2 200 €/kW en moyenne sur les premiers parcs offshore danois et 1 650 €/kW en prévision sur le projet de Horns Rev, toujours au Danemark (8,5 c€/kWh les 10 premières années et 4,9 c€/kWh ensuite).

En France, par exemple sur la Côte d'Albâtre, le **tarif d'achat** de l'électricité éolienne offshore est défini par l'arrêté du 17 novembre 2008 à 13 c€/kWh durant les 10 premières années, puis entre 3 et 13 c€/ kWh, selon la vitesse moyenne du vent sur le site, les 10 années suivantes. Bien que le vent en mer soit plus fort et plus constant que sur terre, ce prix est légèrement plus élevé que celui de l'éolien terrestre, en raison de coûts de raccordements et d'investissements supérieurs. Le tarif français est l'un des plus faibles d'Europe : 15 c€/kWh en Allemagne, 23 c€/kWh au Portugal.<sup>[4]</sup>

La réalisation d'études plus approfondies sur le site du Côte d'Albâtre permettra d'avancer des chiffres consolidés. Par ailleurs, au vu des données spécifiques existant sur les côtes françaises (profondeur, distance à la côte), il faut dès maintenant réfléchir sur la valorisation de l'énergie éolienne : la forme la plus évidente aujourd'hui est bien celle de l'énergie électrique, mais dans un futur proche à l'horizon 2010, une diversification est envisageable, voire un nouvel usage de l'énergie éolienne. Diversification avec des couplages entre d'autres moyens de production de type énergie de la houle, nouvel usage avec les besoins suscités par la filière hydrogène.

Le coût du projet en Haute Normandie est évalué à 300 millions d'euros (2,86 millions €/MW installé). En effet un tel investissement a toujours des retombées locales positives. On pense bien sûr à la phase de travaux, qui créera en Haute-Normandie un très grand nombre d'emplois pour une durée d'environ 3 ans, mais aussi aux activités de surveillance et de maintenance qui nécessiteront une vigilance 7 jours sur 7. De plus la taxe générée (entre 3 et 3,6 millions d'euros / an) sera un complément de taille que se partageront moitié / moitié les communes limitrophes et le fonds maritime créé à cette occasion. En général il faudra compter une dizaine voir une quinzaine d'années pour amortir en totalité la construction de la ferme éolienne de la Côte d'Albâtre.

Il est enfin intéressant de savoir que les communes concernées par l'implantation du parc éolien (en particulier la commune de Fécamp<sup>[5]</sup>), bénéficient de retombées financières directes : taxe professionnelle et foncière, location des terrains, revenus complémentaires pour la population rurale. A titre indicatif, un parc éolien génère une taxe professionnelle assise sur un investissement de l'ordre de 1 000 euros par kW installé, soit pour 10 MW, 10 millions d'euros. S'agissant le plus souvent de petites communes rurales, ces recettes leur permettent de financer des équipements, des améliorations ou des services favorisant le développement local.

La mise en place d'éoliennes est donc génératrice d'activité pour les entreprises locales qui peuvent intervenir à différents stades du projet : études, travaux de génie civil, de génie électrique, exploitation et maintenance. Enfin, la proximité d'une ferme éolienne peut constituer un attrait touristique pour certaines régions.

La mer est un milieu où se mêlent beaucoup d'usages. Est souvent évoquée la facilité d'installer des parcs en mer puisqu'elle est vaste et sans beaucoup de contraintes de vie quotidienne. Cette affirmation ne doit pas être implicite mais nécessite d'être confrontée à l'acceptabilité sociale. Les parcs offshore doivent s'insérer harmonieusement dans ce milieu en tenant compte des principaux usages suivants (liste non-exhaustive) :

- pêche ;
- navigation de plaisance et de commerce ;
- zones réservées diverses (militaires, civiles : écopage d'hydravions et de lutte contre l'incendie, dépôts de dragage, de munitions, etc.) ;
- tourisme côtier.

Des retours d'expériences montrent qu'une valorisation du milieu marin est tout à fait possible :

- activités récréatives (plongée, tourisme) ;
- aménagement des fondations pour créer des récifs artificiels propices à valoriser et gérer les ressources aquatiques.

Les parcs offshore auront une grande dimension et donc occuperont un espace important. Des solutions harmonieuses devront être proposées dès le démarrage des projets pour éviter et pour le moins atténuer dans un effort croissant tous les impacts du système d'exploitation.

## 5. REALISATION D'UN PARC EOLIEN OFFSHORE

### 5.1. Complexité d'un projet offshore

Les éoliennes installées sur les côtes ou en bordure de mer bénéficient de vents puissants et réguliers, car la surface de l'eau ne constitue pas un obstacle (faible rugosité), et parce que la différence de température mer/terre favorise des vents thermiques permanents.

L'installation d'éoliennes en mer est beaucoup plus coûteuse qu'à terre: les mâts doivent être étudiés pour résister à la force des vagues, houles et du courant, la protection contre la corrosion doit être renforcée et une extra protection contre la glace formée autour du pilier doit être présente.

L'implantation en mer nécessite des engins spécialisés, le raccordement électrique implique des câbles sous-marins coûteux et fragiles, et la moindre opération de maintenance peut nécessiter de gros moyens.



**Figure 3 : éoliennes transportées sur bateau**

Malgré les coûts plus élevés pour la construction en mer, il faut savoir que les coûts de construction et de maintenance d'une éolienne augmentent peu en fonction de sa taille.

Le projet offshore de Cote d'Albâtre est formé par 21 éoliennes disposées sur 3 lignes parallèles, avec un espacement de 800m entre les éoliennes de la même ligne, et de 1400m entre les lignes. Cet espacement permet d'éviter les effets de parc. Ces effets se forment à cause turbulences produites par les pales derrière les éoliennes. Si deux ou plusieurs éoliennes sont approchées, le vent n'arrive à entrainer que la première éolienne, avant de remonter sa vitesse et de avoir le même effet sur les autres éoliennes. Les effets de parc baissent la production et donc les parcs sont étudiés avec des grandes espacements pour les éviter.

## 5.2. Types de structures

Plusieurs types de structures d'éolienne ont été proposés par les spécialistes à travers le monde. Les études faites pendant des années ont montré qu'il y a 4 types de structures optimisés pour la construction en mer, chacun adapté à des différentes conditions, comme on va le voir en suite.

### 5.2.1. Gravity Base

Ce type de structure est souvent utilisé pour les petites profondeurs, de maximum 5m. Le pilier a à sa base une assiette en béton suffisamment grande pour résister aux forces exercées par le vent. Au niveau de la surface, la construction présente un renforcement conçu pour dégager la glace qui se forme dans les mers peu salées.

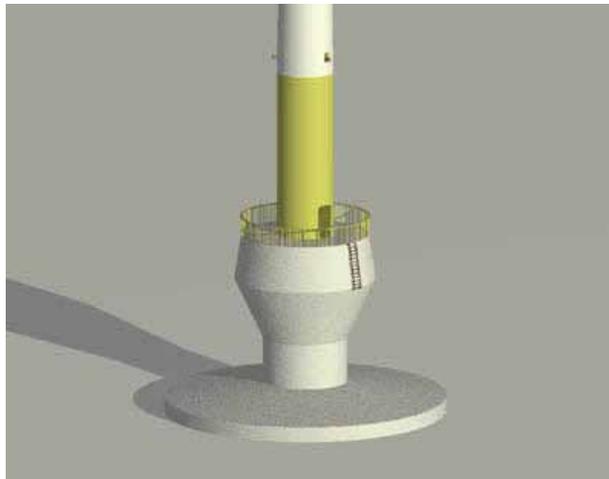


Figure 4 : Gravity Base Structure

### 5.2.2. Monopile

C'est le type de structure utilisé pour les profondeurs d'au maximum 20m. La construction nécessite des études spécifiques du sol et sa composition, pour pouvoir concevoir une base résistante à la force de l'eau.



Figure 5 : Monopile Base Structure

### 5.2.3. Tripod

La technologie du type Trépied n'est pas encore bien établie. Des méthodes de construction sont encore débattues par les bureaux des études à travers le monde. Contrairement au fait que ce type de construction est prévu pour les eaux profondes (plus de 20m), une des seules éoliennes ayant une base sous la forme d'un trépied se trouve dans une zone peu profonde en Suède, elle n'apportant pas beaucoup d'expérience pour la nouvelle technologie. <sup>[8]</sup>

La même technologie est utilisée dans le cadre du projet éolien offshore de Côte d'Albâtre. Les éoliennes sont placées à une profondeur variante de 23 a 27m. C'est donc ce projet qui va tester pour la première fois la nouvelle technologie de structures des piliers.

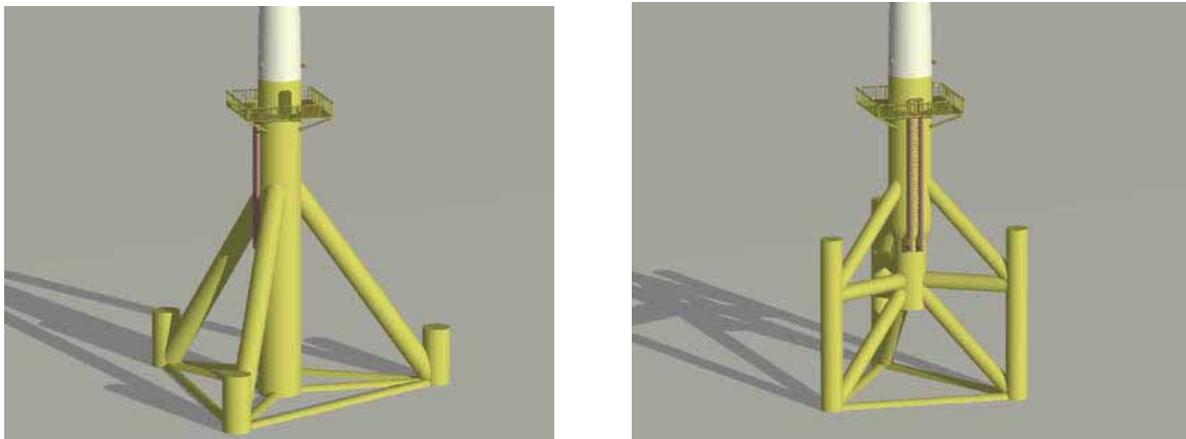


figure 6,7 : Tripod Base Structure

### 4. Floating

Le type d'éoliennes flottantes a pour but de combattre les couts trop élevées de la construction et du courant électrique produit. Cependant, cette technologie ne reste abordable que pour les petites et moyennes profondeurs.

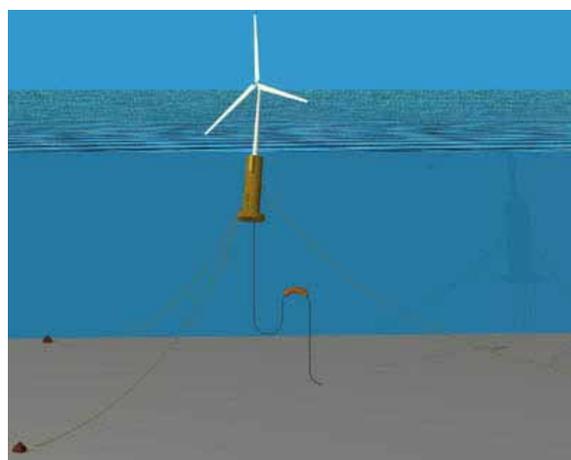


figure 8 : Floating Base Structure

### 5.3. Acheminement de l'énergie

Dans le cas des éoliennes produisant de l'électricité, un poste de livraison situé à proximité du parc éolien permet de relier ce parc au réseau électrique pour y injecter l'intégralité de l'énergie produite par ces éoliennes. Dans le cas d'un parc éolien offshore, les coûts de l'acheminement de l'énergie électrique sont élevées, par rapport aux parcs terrestre, d'environ 25%.

De plus, la technologie utilisée n'est pas la même. Dans le cas d'un projet offshore, les câbles sont par fois produits sur place, par un bateau usine (fig. 9). Ce bateau a au bord tous les matériaux et moyennes nécessaires pour produire constamment du câble électrique. Au fur et à mesure que le câble est produit, il est descendu en mer sur une trajectoire bien étudiée. Ce procès dure jusqu'au point d'arrivée sur terre, où se trouve le poste de livraison d'énergie électrique.



figure 9 : câble électrique produit en mer

Dans le cadre du projet du Cote D'Albâtre, l'acheminement de l'énergie est en état d'étude pour voir si un passage par la région Veulettes-sur-Mer sera possible. Ce choix permettra de éviter les impacts sur les falaises proches et bien connues de la région.

## **6. MAINTENANCE DU SITE DE LA COTE D'ALBATRE**

Comme nous venons de le montrer, une éolienne permet de récupérer l'énergie cinétique du vent, le plus souvent pour produire de l'électricité. De plus, l'une des voies de développement de cette énergie propre réside selon nous dans l'installation de fermes éoliennes, et plus particulièrement sur des sites dits « offshore ». S'affranchissant ainsi en grande partie du problème des nuisances esthétiques, installés dans des secteurs procurant un vent beaucoup plus constant qu'à terre, cette solution permet en effet le développement technique progressif d'éoliennes de très grande puissance.

### **6.1. Maintenance d'un parc éolien terrestre**

Il est donc possible de récupérer de l'énergie électrique en grande quantité en utilisant la force du vent. Il faut pour cela construire ce que l'on appelle des « fermes éoliennes ».

Mais comment s'organise une telle activité ? Comment assure-t-on la maintenance et la gestion d'un tel parc ?

#### **6.1.1. Les aspects de la gestion du parc éolien**

Nous allons désormais nous intéresser à la maintenance d'un site éolien terrestre. En effet une fois en exploitation les fermes éoliennes nécessitent du personnel d'entretien et de contrôle, pour assurer une optimisation de la production.

Il est tout d'abord important de souligner que l'exploitation administrative (gestion) du parc éolien est assurée par les équipes du producteur alors que l'exploitation technique (maintenance préventive ou corrective) est plus généralement assurée par l'intermédiaire d'intervenants locaux formés et donc à même d'effectuer les opérations d'exploitation dans les meilleures conditions et délais. La maintenance des installations est généralement confiée aux fournisseurs des éoliennes afin de garantir la meilleure disponibilité (que l'on estime à au moins 97%) et le maintien des performances des équipements dans le temps (10 ans, 12 ans voire plus). On constate donc que l'installation d'une ferme éolienne entraîne la création, en fonction de sa taille, de nombreux emplois.

La maintenance d'un site éolien nécessite une vigilance 24h/24 ainsi qu'un personnel formé en conséquence.

### 6.1.2. Les frais relatifs à la ferme éolienne

Lors de la mise en exploitation de la ferme éolienne, de nombreux frais doivent être pris en compte, dont notamment :

- ✚ Maintenance préventive (visites régulières qui donnent lieu au remplacement automatique de certaines pièces usées).
- ✚ Damage externe (usure anormale d'une pièce).
- ✚ Performance (bon respect entre la disponibilité des éoliennes et leur courbe de performance).
- ✚ Personnel d'entretien (en général des intervenants locaux).
- ✚ Frais divers (téléphone,...).

Tout d'abord il faut savoir que les éoliennes sont vendues avec une garantie constructeur qui s'étend sur les deux premières années d'exploitation. Cette garantie couvre normalement le damage interne et la performance. Le damage externe n'est donc pas couvert (c'est une garantie que les constructeurs incluent rarement dans leurs contrats).

Au-delà des deux premières années d'exploitation et concernant le damage externe, il a donc fallu souscrire à des assurances spéciales et relativement chères. En effet il est estimé que le coût d'une assurance maintenance préventive plus la garantie de performance se situe aux environ de 15 000 euros/MW/an. Si on souhaite y adjoindre une couverture sur le damage interne, comptez 6000 euros/MW/an en plus. Pour le damage externe, ajoutez de nouveau 6000 euros/MW/an. Et cela ne dispense pas de payer une franchise à chaque sinistre...

De plus, il ne faut pas oublier les pertes d'énergie occasionnées par :

- ✚ l'effet de sillage : deux éoliennes placées à proximité l'une de l'autre vont créer une turbulence. La somme des productibles des deux éoliennes ensemble sera alors inférieure (généralement entre 1 et 4%) à la somme des productibles des deux éoliennes prises séparément.
- ✚ les pertes en ligne ou dues au transformateur (environ 1%).

## 6.2. Maintenance d'un parc éolien offshore : Côte d'Albâtre

La maintenance d'une ferme éolienne offshore reste cependant un peu plus complexe puisqu'il faut en effet mettre en place des dispositifs plus coûteux (bateaux pour accéder au site, assurances plus chères...) et former les intervenants locaux en conséquence. C'est le cas en ce qui concerne le parc éolien offshore de la Côte d'Albâtre, en Haute-Normandie.

L'accès au site par les intervenants se fait soit par voie aérienne (hélicoptère), soit par voie maritime (bateau), ce qui implique une maintenance beaucoup moins facile à gérer que pour l'éolien terrestre. Les procédures d'accès et de sécurité pour les techniciens de maintenance sont donc plus dures. Il faut cependant savoir que les éoliennes offshore sont plus « robustes » que les éoliennes développées pour l'exploitation terrestre, elles sont en effet dotées d'une protection contre la corrosion et d'un système sophistiqué de contrôle.



**Figure 10 : Le site de la Côte d'Albâtre.**

### 6.3. Démantèlement et bilan carbone

Pour finir il faut savoir que la durée de vie d'une éolienne est estimée à 25 ans et un parc éolien est amorti au bout d'une quinzaine d'années. En fin de vie, les parcs éoliens sont démantelés. Au terme de son utilisation, tout exploitant d'une éolienne est responsable de son démantèlement et de la remise en état du site (article L. 553-3 du code de l'environnement). Il doit, au cours de l'exploitation, constituer les garanties financières nécessaires à ces opérations. Ces garanties financières doivent être constituées dès le début de la construction des installations si celles-ci sont situées sur le domaine public maritime, ce qui est le cas de la ferme éolienne du site de la Côte d'Albâtre.

En fin de cycle de vie et après le démantèlement du parc éolien, l'environnement local doit être conservé. En effet la construction et l'exploitation d'éolienne n'endommagent pas la faune et la flore locale.

On notera tout de même la construction de centrales éoliennes offshore est plus coûteuse que celle des centrales onshore, les conditions du vent en mer compensent ces coûts supplémentaires pendant la durée de vie de l'éolienne. De plus l'émission de CO<sub>2</sub> dégagée par la réalisation d'une éolienne est largement compensée par l'absence d'émission pendant l'exploitation.<sup>[11]</sup>

Une rapide analyse du bilan carbone d'un site éolien nous montre ainsi que le coût CO<sub>2</sub> d'une éolienne est pour EDF entre 2 et 20g par kWh, mais que ce dernier s'élève à 26g par kWh pour la production offshore, comme sur le site de la Côte d'Albâtre.

Il est intéressant de savoir que la quantité de béton et d'acier d'une centrale nucléaire EPR par exemple est parfaitement intégrée dans une analyse cycle de vie carbone, et même avec le démantèlement de la centrale, le résultat est tout juste de 6g/kWh!

Le problème du nucléaire quand à lui, c'est le risque, les déchets, le bouleversement de l'équilibre des rivières mais pas les émissions CO<sub>2</sub>... À chacun de juger quelle énergie nous voulons pour demain.

## **7. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES**

### **7.1. Conclusion sur le travail réalisé:**

Pour conclure, la réalisation de ce projet nous a permis de mieux appréhender l'utilité et le fonctionnement, relativement complexe, des parcs éoliens offshore de la conception à l'exploitation.

Nous avons ensuite utilisé ces connaissances pour comprendre les enjeux de la ferme éolienne de la Côte d'Albâtre en Haute Normandie.

### **7.2. Conclusion sur l'apport personnel de cette U.V. Projet:**

Comme nous l'espérions en choisissant ce sujet parmi l'ensemble des projets, nous l'avons trouvé très intéressant.

En effet, il touche un domaine que nous connaissions assez peu ce qui nous a permis de le découvrir. Par ailleurs, nous avons bénéficié d'un bon encadrement ; le sujet n'était pas toujours facile à cerner vu qu'il s'agit d'un sujet très vaste, néanmoins nous avons pu être aidés.

De plus, le travail en équipe nous a plu ; il a en effet été enrichissant de travailler avec des personnes que l'on ne connaissait pas. Dans une perspective d'avenir, cette expérience nous aura donc été très profitable. Cependant nous regrettons un peu que les sujets proposés ne soient pas plus orientés vers nos thématiques respectives. Nous avons aussi rencontré des difficultés concernant le sujet en lui-même, par exemple pour les aspects techniques du fonctionnement de l'éolienne.

Finalement, s'agissant d'une UV de physique, nous nous attendions à un sujet moins théorique et mathématique. Nous aurions aimé construire quelque chose ou bien manipuler un peu plus.

### **7.3. Perspectives pour la poursuite de ce projet:**

Lors de nos recherches, nous avons pu constater que la création de fermes éoliennes offshore était une source d'énergie propre d'avenir, contrairement aux énergies fossiles.

Nous pensons donc que ce sujet pourrait être poursuivi en approfondissant certaines applications. Le développement d'éoliennes de très grande puissance couplées à des turbines sous marines nous paraissent alors un bon moyen de produire d'avantage d'énergie propre.

## 8. BIBLIOGRAPHIE

[1] lien internet : [http://www.ecologie.gouv.fr/IMG/pdf/Guide\\_eolien.pdf](http://www.ecologie.gouv.fr/IMG/pdf/Guide_eolien.pdf)(valide à la date du 02/06/2009).

[2] lien internet : <http://www.bonjour-etampes.com/spip.php?article305> (valide à la date du 13/02/2009).

[3] lien internet : <http://www.ifremer.fr/dtmsi/publications/colloque/SEMINAIRE1.pdf> (valide à la date du 02/06/2009).

[4] Article Fiche SER - FEE Intégralité, Développement du Parc Eolien Offshore Dans le monde, Syndicat des Energies Renouvelables France Energie Eolienne

[5] lien internet : <http://www.gestes-environnement.com/parc-eolien-offshore-des-hautes-falaises-une-opportunit-e-cologique-et-economique/> (valide à la date du 02/06/2009).

[8] lien internet : <http://www.offshorewindenergy.org/> (valide à la date du 02/06/2009).

[10] lien internet : <http://www.thewindpower.net/> (valide à la date du 14/04/2009).

[11] lien internet : <http://www.vestas.com/fr/> (valide à la date du 16/03/09).

## 9. ANNEXES (NON OBLIGATOIRE)

### SCHEMAS DE MONTAGES, PLANS DE CONCEPTION...

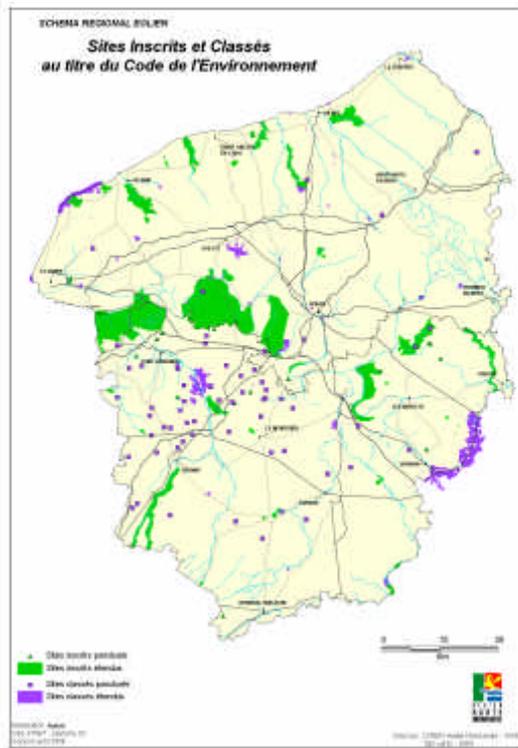


Figure 1 : Carte des vents Français, détaillant les sites susceptibles à la réalisation des parcs éoliens terrestres suivant la vitesse du vent



Figure 2 : Les sites patrimoines protégés par l'Etat