

Université Libre de Bruxelles - IGEAT Institut de Gestion de l'Environnement et d'Aménagement du Territoire Diplôme d'Etudes Spécialisées en Gestion de l'Environnement

Les solutions offertes par les océans et les mers pour répondre à nos besoins en énergie en Europe

Travail de Fin d'Etudes présenté par Renaud BEFAHY en vue de l'obtention du grade académique de Diplômé d'Etudes Spécialisées en Gestion de l'Environnement

> Promoteur : Prof. M. Huart Copromoteur : Prof. M. Degrez

#### REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué directement et indirectement à la réalisation de ce travail.

Je remercie tout particulièrement les Professeurs M. Huart et M. Degrez, promoteurs de ce mémoire de fin d'étude dont les idées, les conseils et les critiques m'ont été d'une aide précieuse.

Mes remerciements s'adressent également à le Professeur C.J. Nihoul, Professeur de Développement Soutenable à l'Université Libre de Liège, Cyrille Abonnel, Chef de projet Hydrolien, EDF R&D – LNHE et Kathy Carvalho, Assistante (Science et Innovation), Ambassade de Grande-Bretagne, Paris, pour leurs nombreux renseignements.

Merci à ma famille pour son soutien tout au long de mes études et, en particulier, de ce travail et à Aurélie pour son aide.

# Résumé du mémoire

A l'heure du développement durable, des solutions doivent être trouvées afin d'assurer un avenir plus serein pour notre Terre. En effet, de nombreux scénarios fournissent une vision pessimiste de notre futur si diverses changements ne sont pas effectués. Un de ceux-ci concerne les émissions les gaz à effet de serre et le réchauffement climatique, qui sont en partie causés par la génération d'électricité à partir de combustibles fossiles que sont le charbon, le gaz et le pétrole. De plus, ceux-ci sont épuisables et une pénurie se présentera tôt ou tard. Ils engendrent également de nombreux conflits politiques et des tensions au niveau mondial. Le nucléaire peut être une solution mais cette filière n'a pas la cote car des accidents, notamment celui de Tchernobyl, ont prouvé qu'elle pouvait engendrer d'énormes catastrophes et le problème de la gestion des déchets radioactifs reste un dilemme important.

Les énergies renouvelables, qui correspondent au cadre du développement durable car leur exploitation n'est pas polluante et ne génère pas de gaz à effet de serre, les ressources sont infinies et elles assurent une dépendance énergétique, semblent être la solution la plus adéquate pour combattre ce problème. L'énergie est alors produite à partir de phénomènes naturels comme le vent, le rayonnement du soleil, les chutes d'eau mais également à partir des mers ou des océans dans lesquels se trouvent une quantité énorme d'énergie. Celle-ci peut provenir des marées, des courants marins, des vagues ou encore du vent soufflant à la surface de l'eau.

C'est ce type d'exploitation de l'énergie qui est abordé dans ce travail. Il ne s'agit bien entendu pas de développer ou de créer une technique d'exploitation mais bien de balayer la situation et le développement actuels.

Ce mémoire reprend les quatre types d'exploitation réalisables en Europe (Exploitation des marées, des courants marins, des vagues et du vent), définit l'état de la technique et du développement ainsi que les ressources. Il étudie ensuite les différents impacts possibles engendrés par ces exploitations. Les aspects environnementaux, économiques, sociaux sont abordés ainsi que les perspectives.

### TABLE DES MATIERES

| Chapitre 1. | Introduction   | 5  |
|-------------|--|----|
| Chapitre 2. | Mise en place du problème                            | 8  |
| 2.1. D      | Définitions des termes énergétiques                  | 8  |
| 2.2. S      | ituation actuelle                                    | 10 |
| 2.2.1.      | Réserves   | 15 |
| 2.2.2.      | Pollution  | 15 |
| 2.2.3.      | Sécurité d'approvisionnement                         | 16 |
| 2.3. D      | Proit et régulation des usages de la mer             | 16 |
| Chapitre 3. | Les différentes technologies                         | 20 |
| 3.1. L      | 'énergie éolienne offshore                           | 20 |
| 3.1.1.      | Définition de l'énergie éolienne                     | 20 |
| 3.1.2.      | Avantages et inconvénients                           | 23 |
| 3.1.3.      | Comparaison avec l'éolien onshore                    | 24 |
| 3.1.4.      | Potentiel  | 25 |
| 3.1.5.      | Impacts environnementaux                             | 26 |
| 3.1.6.      | Impacts sociaux – Impacts sur les activités humaines | 32 |
| 3.1.7.      | Impacts économiques                                  | 36 |
| 3.1.8.      | Perspectives   | 40 |
| 3.2. L      | 'énergie marémotrice                                 | 43 |
| 3.2.1.      | Définition de l'énergie marémotrice                  | 43 |
| 3.2.2.      | L'usine marémotrice de la Rance                      | 45 |
| 3.2.3.      | Potentiel  | 48 |
| 3.2.4.      | Impacts environnementaux                             | 48 |
| 3.2.5.      | Impacts sociaux – Impacts sur les activités humaines | 50 |
| 3.2.6.      | Impacts économiques                                  | 51 |
| 3.2.7.      | Perspectives   | 52 |

| 3.3.          | L'énergie des courants marins                        | 53 |
|---------------|--|----|
| 3.3.1.        | Définition de l'énergie des courants marins          | 53 |
| 3.3.2.        | Potentiel  | 56 |
| 3.3.3.        | Impacts environnementaux                             | 58 |
| 3.3.4.        | Impacts sociaux – Impacts sur les activités humaines | 59 |
| 3.3.5.        | Impacts économiques                                  | 60 |
| 3.3.6.        | Perspectives   | 60 |
| 3.4.          | L'énergie des vagues                                 | 63 |
| 3.4.1.        | Définition de l'énergie des vagues                   | 63 |
| 3.4.2.        | Les systèmes de première génération                  | 64 |
| 3.4.3.        | Les systèmes de seconde génération                   | 65 |
| 3.4.4.        | Potentiel  | 66 |
| 3.4.5.        | Impacts environnementaux                             | 67 |
| 3.4.6.        | Impacts sociaux – Impacts sur les activités humaines | 68 |
| 3.4.7.        | Impacts économiques                                  | 68 |
| 3.4.8.        | Perspectives   | 68 |
| Chapitre      | 4. Tableau récapitulatif                             | 70 |
| Chapitre      | 5. Conclusion  | 71 |
| <i>ANNEXE</i> | ES   |    |
| I. L'         | énergie thermique des mers (ETM)                     | 74 |
| II. L'        | énergie osmotique                                    | 77 |
| III.          | Glossaire  | 78 |
| IV.           | Bibliographie  | 83 |
|               |  |    |

### TABLES DES ILLUSTRATIONS

# Figures

| Figure 1 : Coûts de production de l'électricité                            | 9   |
|--|-----|
| Figure 2 : Evaluation des coûts externes                                   | 9   |
| Figure 3 : Consommation énergétique mondiale                               | 11  |
| Figure 4 : Prévision de la génération d'électricité européenne             | 12  |
| Figure 5 : Prévision de la capacité de production européenne               | 13  |
| Figure 6 : Modes de production électrique européenne                       | 14  |
| Figure 7 : Les zones maritimes   | 17  |
| Figure 8 : Eoliennes offshore  | 20  |
| Figure 9 : Composition d'une éolienne                                      | 21  |
| Figure 10 : Courbe caractéristique d'une éolienne de 750 kW                | 22  |
| Figure 11 : Fondations monopieu, avec un poids massif, tripode, quadripode | 22  |
| Figure 12 : Evaluation de la ressource éolienne                            | 26  |
| Figure 13 : Situation du projet  | 28  |
| Figure 14 : Impact paysager  | 31  |
| Figure 15 : Interaction avec les activité humaines                         | 33  |
| Figure 16 : Evolution du coût d'investissement                             | 36  |
| Figure 17 : Evolution du prix de revient                                   | 37  |
| Figure 18 : Eolienne à flotteur lesté                                      | 41  |
| Figure 19 : Eolienne à lignes tendues                                      | 41  |
| Figure 20 : Eolienne à multi-flotteurs                                     | 42  |
| Figure 21 : Site de la Rance   | 45  |
| Figure 22 : Marémotrice de la Rance  | 46  |
| Figure 23 : Turbines ou bulbes   | 47  |
| Figure 24 : Projet « lagon artificiel » au Pays de Galles                  | 52  |
| Figure 25 : Evaluation de la ressource en courant marin                    | 54  |
| Figure 26 · Premier prototype d'hydrolienne en Norvège                     | 5.5 |

| Figure 27 : Variation du coefficient de marée  | 55 |
|--|----|
| Figure 28 : Courbe de puissance cumulée  | 56 |
| Figure 29 : Sites exploitables en France   | 57 |
| Figure 30 : Production électrique foisonnée sur le littoral breton   | 57 |
| Figure 31 : Remous créés par une hydrolienne   | 58 |
| Figure 32 : Hydroliennes de la société HydroHelix  | 59 |
| Figure 33 : Prix de revient de l'électricité   | 60 |
| Figure 34 : Projet Stingray basé sur la battement caudal   | 61 |
| Figure 35 : Projet Venturi   | 62 |
| Figure 36 : Turbines Darius  | 62 |
| Figure 37 : Les vagues   | 63 |
| Figure 38 : Systèmes de première génération  | 64 |
| Figure 39 : Systèmes de seconde génération   | 65 |
| Figure 40 : Evaluation de la ressource en courant marin  | 67 |
| Figure 41 : Prix de revient de l'électricité   | 68 |
| Figure 42 : Evaluation de la ressource en ETM  | 74 |
| Figure 43 : Usine "Sagar Shakti " en coopération Indo-Japonaise lancée en 2000   | 75 |
| Figure 44 : Concept d'usine ETM - dite "multi-produits" - associant la production d'énergie électrique à d'autr applications de l'eau océanique profonde |    |
| Figure 45 : Principe d'une centrale osmotique  | 77 |
| Tableaux   |    |
| Tableau 2-1 : Conversion des équivalents énergétiques  | 10 |
| Tableau 2-2 : Réserves des combustibles fossiles   | 15 |
| Tableau 3-1 : Caractéristiques des deux sites choisis  | 38 |
| Tableau 3-2 : Coûts de revient en fonction du site   | 39 |
| Tableau 3-3 : Comparaison des densités de puissance moyennes de diverses énergies renouvelables  | 63 |
| Tableau 4-1 : Tableau récapitulatif  | 70 |

# Chapitre 1. Introduction

L'océan et les mers sont de vastes réservoirs d'énergie qui plus est d'énergie renouvelable. Cette énergie se manifeste par des phénomènes naturels dont la puissance a fasciné les hommes depuis très longtemps. Dès l'Antiquité, ceux-ci ont utilisé la force du vent et des courants pour mouvoir leurs bateaux ou encore les marées pour actionner les moulins. Au début de l'ère industrielle, ils ont conçu des machines utilisant l'énergie mécanique des vagues et la chaleur des eaux de l'océan pour servir leur industrie.

Par la suite, ces techniques furent peu à peu mises de côté au profit de l'exploitation de ressources non renouvelables (charbon, pétrole, gaz naturel). En effet, ces dernières présentaient et possèdent toujours actuellement d'ailleurs, de nombreux avantages. Elles étaient relativement abondantes, peu coûteuses et assez facilement exploitables. Mais elles présentent aussi des désavantages : elles sont peu respectueuses de l'environnement, sont limitées (ce ne sont pas des ressources renouvelables) et engendrent des conflits politiques. Elles n'entrent, de ce fait, pas dans le cadre des exigences du développement durable.

Un autre combustible fossile est également utilisé. Il s'agit de l'uranium dans le cadre du nucléaire. Cette filière présente un potentiel énorme avec des réserves estimées à plusieurs centaines d'années et qui pourraient même être multipliée par 50 si l'on utilise la technologie du surgénérateur<sup>1</sup>. Malheureusement, les accidents de Three Mile Island (1979) et de Tchernobyl (1986) ont mis au premier plan les craintes relatives à la sécurité des réacteurs nucléaires. Cette filière n'occupe dès lors qu'une modeste place dans le bilan énergétique mondial même si elle est très importante dans certains pays (France et Belgique notamment). Beaucoup de pays ont décidé de se passer de cette filière pour le futur.

Les techniques d'exploitation de l'énergie marine, qui avaient été mises de côté depuis plusieurs d'années, suscitent un regain d'intérêt car elles correspondent mieux aux exigences actuelles. En effet, elles sont renouvelables donc inépuisables, ne génèrent pas de polluants et de gaz à effet de serre lors de leur exploitation et permettent d'assouvir une sécurité d'approvisionnement.

Les questions à se poser sont les suivantes : « Quelles technologies peuvent exploiter l'énergie marine ? Quel est le potentiel de chacune de ces technologies ? Quels sont les différents impacts engendrés par ces exploitations ? ». Le but de ce travail étant bien sûr de

5

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Technologie des réacteurs à neutrons rapides, qui permet de valoriser l'ensemble des isotopes de l'uranium et non le seul uranium 235

tenter d'y répondre. A noter, que seule la génération d'électricité sur le territoire européen sera abordée.

Les phénomènes marins susceptibles d'être utilisés pour produire de l'énergie sont nombreux. Ce travail reprend les technologies qui ont déjà fait leurs preuves, qui sont capables de produire en grande quantité (jusqu'à plusieurs millions de watts) et pour lesquels les estimations de coûts de production sont acceptables économiquement à plus ou moins long terme.

Le critère d'acceptabilité économique doit également tenir compte de l'évolution des prix des énergies traditionnelles (charbon, gaz naturel, pétrole). En effet, la raréfaction de ces ressources dans les décennies à venir risque de provoquer une augmentation de leur prix. De plus, ces énergies sont polluantes et engendrent des coûts externes<sup>2</sup> qu'il ne faut pas négliger.

Les phénomènes et les technologies de conversion retenus sont :

- o la marée avec les marémotrices,
- o les courants marins avec les hydroliennes,
- o le vent avec les éoliennes offshore,
- o la houle ou les vagues avec les houlomotrices,
- o la différence de température en fonction de la profondeur avec le procédé « ETM Energie Thermique des Mers ».
- o l'énergie osmotique

Les marées résultent de l'action des forces gravitationnelles. Les autres phénomènes cités proviennent d'échanges d'énergie et de matière (de l'eau notamment sous ses trois formes : liquide, vapeur et glace) entres les masses d'eaux océaniques, l'atmosphère et les terres émergées. Cependant, les courants marins exploitables énergétiquement sont plutôt ceux créés par les marées. L'ETM puise dans la chaleur stockée dans l'eau de surface de l'océan tropical. Les éoliennes et les houlomotrices puisent dans le flux commun de l'énergie mécanique exprimée par le vent dont la source primaire est la même que celle de l'ETM : c'est l'apport thermique du Soleil à la planète Terre.

Le procédé ETM ainsi que l'énergie osmotique ne seront pas débattus dans ce travail. Pour le premier procédé, les ressources ne se trouvent pas en Europe et pour le second, le principe est en cours de développement et n'est pas utilisable actuellement. Un résumé de ces technologies se trouve néanmoins en annexe.

Ces technologies sont dites renouvelables car leurs ressources sont illimitées (à l'échelle de l'exploitation énergétique) dans le temps et n'utilisent pas de ressources

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Les coûts externes sont les coûts engendrés par le transport au niveau des accidents, du bruit, de la pollution atmosphérique (santé, dégâts matériels et dégradation de la biosphère), du changement climatique, de la nature et du paysage et des coûts additionnels en site urbain. Ce sont les coûts imposés à la société et à l'environnement qui ne sont supportés ni par les producteurs, ni par les consommateurs. (Exemple : impacts sur la santé des émissions de SO2 des centrales à charbon)

épuisables comme le pétrole, le gaz ou le charbon. En effet, mis à part de grands changements dans le fonctionnement global de la Terre, ni les marées, les vagues, le vent ou encore le rayonnement solaire ne vont se stopper ou s'épuiser. De plus ces technologies sont par nature réputées non ou peu polluantes au point de vue des rejets dans la mesure où elles n'introduisent dans la biosphère ni énergie, ni composants chimiques nouveaux (attention cependant à la corrosion). Cependant, il ne faut pas croire qu'elles n'ont aucun impact. En effet, elles impliquent des perturbations des flux naturels d'énergie et de matière, des emprises sur le domaine maritime, des contraintes pour la navigation et d'autres nuisances, visuelles, voire auditives. Ces impacts doivent être évalués et le rapport avantage sur désavantage doit être calculé pour estimer dans quelle mesure et à quelle échelle ces technologies peuvent être employées. Des limites d'acceptabilité environnementale et sociale de l'exploitation de ces ressources doivent être fixées.

Dans ce travail, après une mise en place du problème afin de bien comprendre l'importance des énergies renouvelables, chaque technologie sera détaillée. Pour chacune d'entre elles, le principe sera expliqué. Ensuite, le potentiel, les différents impacts (environnementaux, sociaux, économiques) et différentes perspectives seront abordés. Pour terminer, une conclusion reprendra les avantages et les inconvénients de chaque technologie.

Les termes en gras sont définis à la fin de ce travail dans la partie glossaire.

# Chapitre 2. Mise en place du problème

Afin de définir au mieux les enjeux des énergies renouvelables et plus particulièrement des énergies marines, il est important de connaître la situation actuelle au niveau énergétique. Tout d'abord, différents termes vont être définis afin d'assurer une bonne compréhension. Ensuite, le droit et la régulation des usages qui prévaut en mer seront définis car c'est le premier domaine auquel il faut s'intéresser en cas d'exploitation marine.

# 2.1. Définitions des termes énergétiques

L'énergie est ce qui permet de mettre la matière en mouvement. Un corps est mis en mouvement ou modifie son énergie interne quand un travail y est exercé ou une quantité de chaleur lui est transmise. L'unité du système international est le Joule (J).

La puissance est l'énergie développée dans un laps de temps. La puissance est l'énergie transférée par unité de temps ou encore la capacité de transférer de l'énergie dans un temps donné. La puissance est exprimée en Watt (W). Les unités dérivées les plus souvent utilisées sont le kW, MW, le GW et le TW qui correspondent à des multiples de Watts avec :

```
k = kilo = 10<sup>3</sup>
M = Méga = 10<sup>6</sup>
G = Giga = 10<sup>9</sup>
T = Tera = 10<sup>12</sup>
```

La puissance mécanique d'un homme en plein effort par exemple est de 200 W, celle d'une voiture moyenne est de 30 à 90 kW et l'irradiation du soleil par ciel serein avoisine les 1000 W/m².

Différentes unités peuvent être utilisées pour l'énergie. Hormis l'unité du système international (J), par soucis de commodité, d'autres unités sont généralement utilisées, comme le kWh, la tep ou la Kcal

Le kWh est l'énergie délivrée par un travail d'une puissance de 1000 W pendant une heure, ou encore d'une puissance de 100 W pendant 10 heures. Il correspond à 3600 kJ. Les coûts de production d'un kWh électrique varient selon le mode de fabrication. La figure

suivante les détaille en ce qui concerne les trois principaux types de production à base de combustibles fossiles.

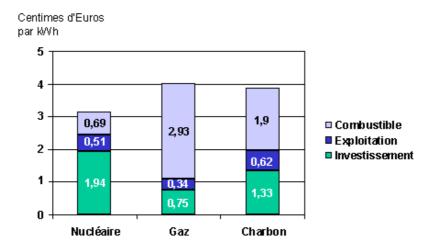


Figure 1 : Coûts de production de l'électricité (Source DIGEC, 2001)

Le coût de production d'un kWh varie donc entre 3 et 4 c€. Si les coûts externes sont introduits dans ce prix, la valeur peut presque être doublée surtout dans le cas du charbon. Pour le particulier, il est plus cher car le coût de la distribution et les taxes doivent être ajoutées. Il s'élève alors à 17c€ en Belgique.

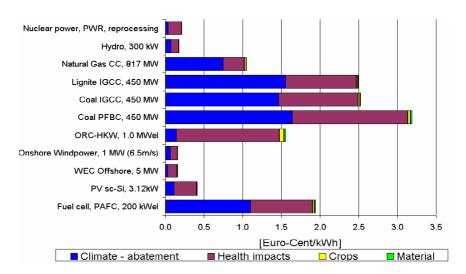


Figure 2 : Evaluation des coûts externes (Source ExternE, 2001)

Il serait abusif de croire que les énergies renouvelables n'introduisent pas de coûts externes. En effet, une éolienne, par exemple, a un impact sur l'environnement. Les matériaux de fabrication sont conçus par des processus utilisant des énergies fossiles et contribuent alors au réchauffement climatique. Mais, comme on peut le remarquer sur cette figure, les coûts externes engendrés par les énergies renouvelables sont très faibles comparés à ceux des filières plus traditionnelles.

La tep signifie tonne d'équivalent pétrole. La tonne d'équivalent pétrole est une unité conventionnelle standardisée définie sur la base d'une tonne de pétrole ayant un pouvoir calorifique inférieur de 41868 kJ/kg.

En matière de production pétrolière, on utilise couramment le baril par jour (b/j) et l'équivalence est 1 Mtep = 20000 b/j (1 baril = 159 litres). Une tonne de pétrole correspond à 1165 litres, soit 7.33 barils. Pour le gaz naturel, 1 Gm³ = 0.9 Mtep et pour le charbon, une tonne correspond à 23302 kJ soit 0.55 tep.

Le tableau ci-après donne, pour les principales ressources énergétiques, les éléments de conversion nécessaires à la transformation des quantités physiques en équivalent énergétiques conformes aux règles internationales.

| De  | A, multiplier par |             |             |                       |                      |
|---|-------------------|-------------|-------------|-----------------------|----------------------|
|   | Mtep              | Mtec        | Gm³ GN      | GJ                    | MWh                  |
| Million tonne<br>équivalent pétrole<br>(Mep)  | 1                 | 1,796       | 1,111       | 41860 10 <sup>3</sup> | 11627 103            |
| Million tonne<br>équivalent charbon<br>(Mtec) | 0,557             | 1           | 0,62        | 23302 10 <sup>3</sup> | 8130 10 <sup>3</sup> |
| Giga mètre cube de<br>gaz naturel<br>(Gm³ GN) | 0,9               | 1,62        | 1           | 37,674 106            | 10,763 106           |
| Giga Joules (GJ)                              | 23,889 10-9       | 42,915 10-9 | 26,544 10-9 | 1                     | 0,278                |
| Mégawatt heure<br>(MWh)                       | 8,568 10-7        | 1,230 10-7  | 95,480 10-9 | 3,600                 | 1                    |

Tableau 2-1: Conversion des équivalents énergétiques

Et pour finir la Kcal, qui est moins utilisée dans le domaine énergétique, correspond à 4186 J.

### 2.2. Situation actuelle

L'énergie est le sang qui coule dans les veines de l'économie. L'énergie est un élément essentiel du cadre de vie des citoyens, de la compétitivité de nos économies et de l'emploi. Nous sommes tous quotidiennement dépendants des approvisionnements en énergie, mais il faut parfois en être privé pour s'en rendre compte lors d'évènements majeurs ou catastrophiques. On peut rappeler les paralysies des régions françaises, dévastées par les tempêtes de décembre 1999, les blocages routiers organisés en septembre 2000 par les transporteurs pour protester contre la hausse du carburant liée à la flambée des prix du pétrole, les black-out dans le Nord Est des USA, au Canada le 14 août 2003, à Londres le 28 août 2003 et en Italie le 28 septembre 2003

La consommation énergétique augmente en moyenne de 2,3% par an depuis près de 150 ans. Elle s'élève actuellement à 10 Gtep par an.

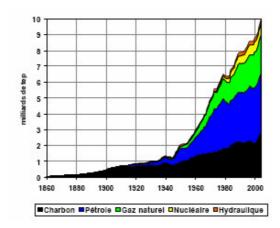


Figure 3 : Consommation énergétique mondiale (Source BP Statistical Review of World Energy juin 2005, AIE)

Du point de vue thermodynamique, notre civilisation se comporte comme un moteur gigantesque de 13 TW de puissance. Soit l'équivalent d'une résistance chauffante pour chauffer l'eau du thé de 2 kW par habitant de la terre. C'est presque autant que la puissance géothermique de la terre (16 TW).

L'énergie est un élément vital de l'humanité, il faut donc assurer un « droit à l'énergie » à chacun, riche ou pauvre, citadin ou isolé. L'énergie a été déclarée « bien de consommation » par la Cour de Justice Européenne avec comme conséquence l'obligation de lui permettre la libre circulation dans l'Union Européenne, ouvrant ainsi les marchés de l'énergie. Mais l'énergie n'est néanmoins pas un marché comme les autres, car il n'y a pas profits immédiats. De plus, l'électricité ne pouvant être stockée, il faut assurer instantanément l'égalité entre offre et demande. Discipline interdisciplinaire, il faudrait davantage d'ingénieurs, d'économistes et de sociologues, professions peu présentes dans ce domaine, il y a quelques années encore.

Le défi de l'énergie est probablement un des plus sérieux que l'humanité devra relever (avec celui de l'eau), car l'énergie conditionne la possibilité d'un cadre de développement durable et harmonieux. Il touche des domaines fondamentaux de notre cadre de vie socio-économique :

- O Domaine économique : la compétitivité de l'économie dépend directement de la disponibilité et du niveau des prix de l'énergie.
- O Domaine politique : chacun désire garantir son accès aux ressources énergétiques et si possible son indépendance. Ceci est le domaine délicat de la géopolitique.
- O Domaine écologique : la production d'énergie implique toujours un impact sur l'environnement même si des progrès sensibles ont été réalisés ces dernières années.

Le monde de l'énergie est soumis à une triple croissance :

- o croissance démographique
- o croissance économique
- o croissance de la demande énergétique

Le marché de l'électricité suit les mêmes principes. Les besoins d'électricité dans l'UE-25 ont augmenté en moyenne de 1,6% depuis 1990 (près de 1,9% par année pour UE-15, tandis que dans les pays d'adhésion, les besoins d'électricité sont restés stables aux niveaux de 1990). La profonde restructuration des économies des **PECO** a entraîné une baisse de la demande d'électricité dans ces pays de -1,5% par année de 1990 à 1995, qui a été fortement liée à la fin progressive des politiques de subvention pour les prix d'électricité. Néanmoins, cette tendance à la baisse s'est inversée dans la deuxième partie de la dernière décennie avec la demande d'électricité augmentant de 1,5% par année. Actuellement, la consommation s'élève à 2800 TWh par an.

Concernant les prévisions, établies par le modèle POLES<sup>3</sup>, la hausse de la demande et de la production d'électricité mondiale augmente régulièrement à un taux moyen de 3 % par année de 2000 à 2030, à un niveau de 2,3 fois plus élevé en 2030 qu'en 2000.

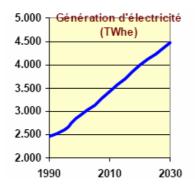


Figure 4 : Prévision de la génération d'électricité européenne (Source TREN, 2005)

A noter que d'autres scénarios ont également été établis, par les modèles PRIMES ou ACE notamment et ne seront pas utilisés ici. Ces scénarios ne fournissent pas exactement les mêmes chiffres mais confirment les tendances. Ce sont celles-ci qui sont importantes à retenir.

En 2030, plus de la moitié de la production d'électricité totale sera fournie par les technologies émergées à partir des années 90, comme les énergies renouvelables, les cycles

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Ce modèle identifie trente-huit régions mondiales ou pays, dont les 15 pays de l'UE d'avant le 1/5/2004 et les plus grands pays (États-Unis, Canada, Japon, Chine, Inde, Brésil, etc.). La structure du modèle correspond à un système hiérarchique de modules interconnectés et implique trois niveaux d'analyse : les marchés internationaux de l'énergie, les bilans énergétiques régionaux et les modèles nationaux sur la demande énergétique, les nouvelles technologies et les énergies renouvelables, la production d'électricité, l'approvisionnement en énergie primaire et les émissions de CO2. La dynamique du modèle est basée sur un processus récursif de simulation, dans lequel la demande énergétique et l'offre dans chaque module national ou régional répondent avec différentes structures de retard aux variations Ce modèle identifie trente-huit régions mondiales ou pays, dont les 15 pays de l'UE d'avant le 1/5/2004 et les plus grands pays (États-Unis, Canada, Japon, Chine, Inde, Brésil, etc.). La structure du modèle correspond à un système hiérarchique de modules interconnectés et implique trois niveaux d'analyse : les marchés internationaux de l'énergie, les bilans énergétiques régionaux et les modèles nationaux sur la demande énergétique, les nouvelles technologies et les énergies renouvelables, la production d'électricité, l'approvisionnement en énergie primaire et les émissions de CO2. La dynamique du modèle est basée sur un processus récursif de simulation, dans lequel la demande énergétique et l'offre dans chaque module national ou régional répondent avec différentes structures de retard aux variations internationales des prix dans les périodes précédentes. Dans chaque module, les équations internationales des prix dans les périodes précédentes. Dans chaque module, les équations comportementales prennent en considération la combinaison d'effets des prix, de contraintes et de tendances technico-économiques.

TGV (Turbine Gaz Vapeur) ou les technologies avancées d'utilisation du charbon. Ces deux dernières technologies à base de combustibles fossiles devraient remplacer en grande partie les centrales thermiques classiques à la fin de la période. La part de la production des centrales au charbon «classiques» dans la production d'électricité devrait diminuer de 36% en 2000 à 12% en 2030 tandis que la part de celle fonctionnant au gaz passe de 16% à 25% et celle de charbon «avancé» prend une part de 33% en 2030

Malgré une expansion continue, le développement de l'énergie nucléaire ne suit pas la production d'électricité totale : la part du marché mondial du nucléaire descend à 10% de la production d'électricité totale en 2030, venant de 18% en 2000. La même chose s'applique, bien que dans une moindre mesure, à la grande hydroélectricité, dont la part de marché passe de 19% à 13 %. Au contraire, la part des autres technologies d'énergies renouvelables devraient connaître une augmentation rapide, notamment l'énergie éolienne qui connaîtra une croissance d'environ 11 % par année au niveau mondial.

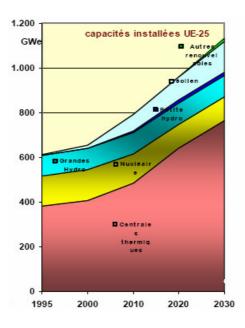


Figure 5 : Prévision de la capacité de production européenne (Source TREN, 2005)

Dans le futur, la demande d'électricité devrait présenter un taux de croissance bien au dessus de la moyenne de la demande finale des autres énergies. Le nombre croissant des processus industriels, d'appareils qui fonctionnent à l'électricité, la caractéristique unique de l'électricité fait que son utilisation sera croissante dans le système énergétique de l'UE-25. Cette projection est en ligne avec la tendance à long terme bien connue vers l'électrification accrue dans la plupart des secteurs des économies développées. Ainsi, la demande d'électricité devrait se développer au rythme de 1,5% par année au cours de la période 2000-2030. Cette croissance sera spécialement rapide dans le secteur tertiaire, tandis que la demande dans le secteur résidentiel croît également à un taux au dessus de la moyenne. Les différents niveaux d'électrification dans l'UE-15 et également dans les pays d'adhésion d'ici 2000 sont clairement reflétés dans l'évolution de la demande d'électricité en 2030. Ainsi, tandis que la demande d'électricité augmente de 1,3% par année dans les UE-15 entre 2000 et 2030, avec une décélération dans le temps, la croissance est beaucoup plus prononcée

pour les pays d'adhésion (+ 2,2% par année en 2000-2030) avec un rythme accéléré dans la période jusqu'en 2020.

Au cours de la période 2000-2030, le gaz naturel deviendra la source d'énergie la plus importante pour la production d'électricité. En effet, le pétrole et le nucléaire perdent des parts de marché. Les combustibles solides reviendront à leur niveau de 1990 en terme absolu mais diminueront comme les autres en part de marché. Les énergies renouvelables deviendront beaucoup plus importantes pour la production d'électricité, correspondant presque à la part du nucléaire d'ici 2030.

Actuellement, approximativement la moitié de l'électricité de l'UE est produite à partir de sources d'énergie sans carbone (énergies renouvelables et nucléaire). Étant donné l'élimination progressive du nucléaire décidée dans certains États membres, et malgré la forte pénétration relative prévue des énergies renouvelables, cette part tombera à 34.8% d'ici 2030. La part de production combinée de chaleur et d'électricité (PCCE - CHP en anglais) augmente seulement modérément, malgré son rôle clé pour une utilisation efficace des combustibles fossiles.

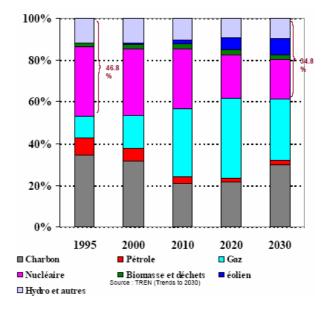


Figure 6 : Modes de production électrique européenne (Source TREN 2005)

Les besoins d'investissement dans la production d'électricité sont substantiels car il faudra porter la capacité installée des 580 GW actuels à environ 1000-1100 GW en 2030. D'importants nouveaux investissements seront nécessaires, non seulement pour répondre à l'augmentation de la demande d'électricité, mais aussi parce que bon nombre des centrales existantes vieillissent et doivent être remplacées. Au cours de ces 30 prochaines années, nous devrons investir autant que ce qui est déjà installé. Grosso modo, cela revient à construire une centrale tous les quinze jours. Bien qu'impressionnant, ce chiffre tient compte du remplacement programmé de certaines centrales arrivées en fin de vie. La croissance des capacités de production dépasse celle de la génération d'électricité du fait du développement des énergies renouvelables qui ont une plus faible utilisation annuelle des capacités de production (étant donné la disponibilité fluctuante de l'eau pour la génération de l'hydroélectricité et la génération intermittente des autres énergies renouvelables).

Malgré ces besoins considérables en investissement et l'augmentation du prix des combustibles, particulièrement pour le gaz naturel, le prix de l'électricité diminuera avec le temps reflétant des gains d'efficacité dérivés des progrès technologiques, des changements de combustibles et de l'achèvement du marché intérieur.

Ce scénario prouve qu'il est indispensable de développer et d'utiliser de nouvelles technologies renouvelables si l'on veut assurer le développement durable. Car même si les technologies propres semblent prendre de plus en plus d'importance, elles ne font que remplacer le nucléaire qui génère peu d'émissions de carbone.

Comme dit précédemment, actuellement approximativement 50% de l'électricité produite en EU provient de combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel et charbon). Ceux-ci présentent les désavantages suivants :

- Ils sont épuisables
- Ils sont polluants
- o Ils entraînent une dépendance énergétique vis-à-vis des pays producteurs

### 2.2.1. Réserves

Les réserves sont bien entendu des estimations et évoluent dans le temps car de nouveaux gisements peuvent être découverts et de nouvelles technologies peuvent permettre de mieux exploiter les gisements existants ou rendre accessibles des gisements qui ne l'étaient pas jusqu'ici. Elles sont reprises dans le tableau suivant d'abord, en termes de Gtep et ensuite, en termes d'années et sont basées sur la consommation énergétique actuelle.

| En 2004            | Pétrole | Gaz naturel | Charbon |
|--------------------|---------|-------------|---------|
| Réserves en Gtep   | 166     | 162         | 463     |
| Réserves en années | 41      | 67          | 164     |

Tableau 2-2: Réserves des combustibles fossiles (Source BP Statistical Review of World Energy juin 2005, AIE)

### 2.2.2. Pollution

Les pollutions liées au secteur énergétique sont multiples. En effet, les combustibles fossiles et leurs traitements influent sur la pureté de l'air, la température (gaz à effet de serre), la conservation des paysages, les déchets,... La sécurité est également primordiale tant au niveau des transports que des installations. Tout le monde se souvient des marées noires de l'Erika ou encore de l'Amoco Cadiz.

Les principaux polluants liés à ces ressources sont le SO<sub>2</sub>, les NO<sub>x</sub>, le NH<sub>3</sub>, les COV et le CO. Tous ces composés ont des impacts négatifs sur la qualité de l'air et peuvent avoir des répercutions très importantes comme les pluies acides engendrées par le SO<sub>2</sub>.

Il ne faut bien évidemment pas oublier le CO<sub>2</sub> qui n'est pas considéré comme un polluant mais bien comme un gaz à effet de serre. Tout comme le CH<sub>4</sub>, le N<sub>2</sub>0 et les chloro-fluoro-carbones (CFC) ainsi que certains composés soufrés (SF<sub>6</sub>), le CO<sub>2</sub> provoque une augmentation de la température globale du la planète Terre. Le CO<sub>2</sub> en est responsable à 66%. Il représente de ce fait un des plus grands dilemmes de la société actuelle.

### 2.2.3. Sécurité d'approvisionnement

Les ressources énergétiques ne sont pas également réparties sur le globe. Certaines régions sont favorisées. L'Europe n'en fait pas partie. Le cas du pétrole est certainement le plus probant. En effet, 63.3% des réserves sont situées au Moyen-Orient ou encore 80% dans les pays de l'OPEP<sup>4</sup> et cette tendance ne fera qu'augmenter dans les années futures selon les prévisions. L'OPEP fonctionne comme un cartel et les relations avec les pays européens ou les USA ne sont pas toujours au beau fixe. Du fait de leurs importantes réserves, ces pays producteurs se sont rendus compte de leur puissance et ont pu en jouer lors des deux chocs pétroliers des années 70. Les pays occidentaux se sont alors rendus compte qu'une trop grande dépendance envers ces pays était néfaste et qu'il était nécessaire de diversifier ses approvisionnements énergétiques. Ce qui peut être réalisé par les énergies renouvelables notamment.

Tous les chiffres cités précédemment et les caractéristiques ci-dessus sont une sonnette d'alarme pour le futur de notre planète. En effet, seul un plus grand développement d'énergies propres et renouvelables peut permettre d'éviter un des plus grands problèmes auquel l'homme a été confronté, le changement climatique.

# 2.3. Droit et régulation des usages de la mer

Contrairement aux usages traditionnels (pêche, transport, navigation...), les installations de production d'énergie mobilisent généralement l'espace de manière permanente et souvent exclusive. Le cadre juridique de la régulation des usages en mer (essentiellement associé à la navigation) est désormais insuffisant, de même que le cadre traditionnel de l'urbanisme (planification spatiale) qui semble s'étendre en mer avec les réglementations sectorielles associées à des activités naguère purement terrestres, bien qu'il soit mal adapté à la régulation d'activités essentiellement « nomades » et non exclusives dans un espace public à trois dimensions.

La mer est un espace public contrairement à la terre. Ceci implique des contraintes très spécifiques pour le gestionnaire car l'espace marin doit rester accessible à tous. De la

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> L'OPEP est l'organisation de gouvernements qui défend les pays producteurs de pétrole. Elle est composée par l'Algérie, l'Arabie Saoudite, les Emirats Arabes Unis, l'Indonésie, l'Irak, l'Iran, la Libye, le Koweït, le Nigeria, le Qatar et le Venezuela.

même manière, les ressources marines sont des ressources publiques. Ceci est vrai qu'il s'agisse de ressources renouvelables (ressources halieutiques, ressources énergétiques, bioressources), ou non renouvelables (comme l'essentiel des ressources du sol et du sous-sol : hydrocarbures, minéraux...).

Le droit en mer découle principalement du droit international de la mer, et notamment de la Convention des Nations Unies sur le Droit de la Mer signée à Montego Bay en 19825 et entrée en vigueur en 1994. Cette convention a créé ou confirmé un certain nombre de zones, et y a défini les droits et les devoirs des Etats côtiers. Les eaux intérieures sont sous la souveraineté de l'Etat côtier, qui peut y imposer des réglementations au même titre que sur son territoire national (ces réglementations peuvent concerner le fond de la mer ou son sous-sol, mais aussi la colonne d'eau et l'espace aérien surjacent). La mer territoriale peut s'étendre jusqu'à 12 milles<sup>6</sup> des lignes de base. La souveraineté de l'État côtier s'étend au-delà de son territoire sur cette zone maritime qui comprend le fond et le sous-sol de la mer, la colonne d'eau et l'espace aérien surjacent. Le plateau continental est constitué par le sol et le sous-sol de la mer au-delà de la mer territoriale. En l'absence de revendication par un autre État côtier opposé ou adjacent, ce plateau s'étend vers la haute mer jusqu'à 200 milles, et même au-delà (« plateau continental étendu ») si les caractéristiques géologiques du fond de la mer le permettent. Sur le plateau continental, l'État côtier a le droit exclusif d'exploiter les ressources du sol et du sous-sol. Les Etats côtiers peuvent enfin créer une zone économique exclusive (ZEE), qui peut s'étendre jusqu'à 200 milles des lignes de base. Dans cette ZEE (qui comprend le fond et le sous-sol de la mer et la colonne d'eau), ils ont le droit exclusif d'exploiter les ressources vivantes ou non-vivantes

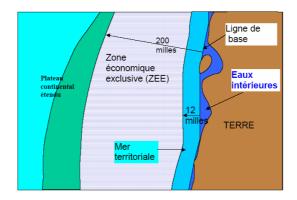


Figure 7 : Les zones maritimes (Source : Nations Unies, 2002)

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Suite à la remise en cause par les pays en développement de certaines règles posées par les textes adoptés à Genève, la troisième conférence sur le droit de la mer est convoquée par l'ONU. Celle-ci siège de 1973 à 1982 et débouche sur la signature à Montego Bay (Jamaïque) de la Convention des Nations Unies sur le droit de la mer (CNUDM). Son entrée en vigueur n'intervient qu'en novembre 1994, après un amendement en profondeur des dispositions les plus contestées par les pays industrialisés par l'accord du 29 juillet 1994. La France ratifie la convention en 1996. La plupart des grands pays industrialisés l'ont ratifiée, à l'exception des États-Unis.

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Le mille nautique ou mille marin (nautical mile, symbole NM) est une unité de mesure utilisée en marine et en aviation. Le mille nautique international vaut 1 852 mètres.

En mer, l'Etat est seul compétent en matière d'administration. Il assume deux types de fonctions. Premièrement, il est gestionnaire de l'espace et des ressources publiques et ensuite, il est régulateur des usages de la mer. Dans son rôle de gestionnaire, l'Etat définit les règles de gestion et les modalités d'usage des ressources renouvelables ou non renouvelables. Certaines de ces compétences sont partagées au niveau de l'Union Européenne. Dans son rôle régulateur, l'Etat est responsable de la définition et de l'application des règles relatives à ces usages (réglementations sectorielles), et arbitre des conflits éventuels. L'importance des ces rôles augmente au cours de ces dernières années car les usages de la mer, naguère limités à la pêche, le transport maritime, la conchyliculture et la navigation en général, s'étendent à un nombre croissant d'activités liées au tourisme, aux loisirs, aux communications, à l'extraction d'hydrocarbures et de matériaux, et bien entendu à la production et au transport d'énergie.

Les technologies actuelles ne permettant pas d'implanter les installations de production d'énergie renouvelable marine dans des grandes profondeurs et le transport de l'électricité vers la terre nécessitant des câbles très coûteux dès que les longueurs deviennent élevées, les installations s'implantent en zone côtière. Ces zones sont déjà très disputées par des activités marines plus traditionnelles et de plus, ce sont des zones généralement très sensibles au niveau environnemental ainsi qu'en ce qui concerne les contraintes paysagères. De plus, ces implantations sont fixes et mobilisent l'espace de manière permanente alors que les autres activités marines sont généralement « nomades ». Ces nouveaux usages de la mer entraînent des incompatibilités entre eux. Actuellement, aucune réglementation précise n'existe à ce sujet.

C'est le cadre réglementaire belge qui est pris en compte dans ce travail. On note peu de différences avec les autres pays, avec la France notamment. Seules les grandes lignes seront présentées afin de percevoir les différentes démarches à accomplir pour les installations offshore.

La loi belge du 20 janvier 1999 sur la protection du milieu marin a pour objet « le maintien du caractère spécifique, de la biodiversité et l'intégrité du milieu marin ». Elle est entrée en vigueur le 22 mars 1999 et mise à jour le 13 octobre 2005. Cette loi définit des mesures de protection du milieu marin et prévoit des mesures de restauration des dommages et des perturbations de l'environnement.

Les principaux points de cette loi sont repris dans les articles 4 et 5.

L'article 4 prévoit que lorsqu'ils mènent des activités dans les espaces marins, les utilisateurs de ces espaces et les pouvoirs publics doivent tenir compte du principe de prévention, du principe de précaution, du principe de la gestion durable, du principe du pollueur-payeur et du principe de réparation. Le principe de prévention implique qu'il faut agir afin de prévenir un dommage plutôt que d'avoir à réparer ce dommage par la suite. Le principe de précaution signifie que des mesures de prévention doivent être prises lorsqu'il y a des motifs raisonnables à s'inquiéter d'une pollution des espaces marins, même s'il n'existe pas de preuve concluante d'un lien causal entre l'introduction de substances, d'énergie ou de matériaux dans les espaces marins et les effets nuisibles. L'application du principe de gestion durable dans les espaces marins implique que les ressources naturelles sont tenues dans une mesure suffisante à la disposition des générations futures et que les

effets des interventions de l'homme ne dépassent pas les capacités d'absorption de l'environnement des espaces marins. A cette fin, les écosystèmes et les processus écologiques nécessaires pour le bon fonctionnement du milieu marin seront protégés, la diversité biologique sera préservée et la conservation de la nature sera stimulée. Le principe du pollueur-payeur implique que les coûts de prévention, de réduction et de lutte contre la pollution et les coûts de réparation des dommages sont à charge du pollueur. Le principe de réparation implique qu'en cas de dommage ou de perturbation environnementale dans les espaces marins, le milieu marin est rétabli dans la mesure du possible dans son état original.

Dans l'article 5, il est prévu que toute personne menant des activités dans les espaces marins a l'obligation d'adopter un comportement diligent afin d'éviter tout dommage et toute perturbation environnementale. En particulier, le propriétaire de navire a l'obligation de prendre toutes les précautions nécessaires pour prévenir et limiter la pollution.

Plusieurs arrêtés ont été pris en exécution de cette loi et concernent la demande et l'obtention d'une autorisation (pour la construction) et d'un permis (pour l'exploitation) d'une activité dans les espaces marins sous la juridiction belge ainsi que l'établissement d'une étude d'incidence sur l'environnement. Ce rapport d'incidence doit couvrir sur la construction, l'exploitation et le démantèlement du parc éolien mais également sur les câbles souterrains assurant le transport de l'électricité. Il convient aussi de tenir en compte des différentes zones de protection particulières pour certaines espèces d'oiseaux protégées (directive sur les oiseaux) ou zones de sauvegardes de la biodiversité (directive sur l'habitat).

Un exemple de l'application de ces arrêtés est le refus récent à Electrabel des permis nécessaires à l'érection d'éoliennes devant être situées à une vingtaine de kilomètres de la plage knokkoise. En effet, une habitante de Knokke-Heist, soutenue par le bourgmestre, avait introduit un recours au Conseil d'Etat contre ce projet en reprochant aux éoliennes de gâcher la vue des habitants et des touristes de Knokke-Heist ce qui porterait donc un préjudice au tourisme local. Après deux ans de procédure, le Conseil d'Etat a rejeté cette plainte mais malgré cela le Gouvernement a décidé de revoir son point de vue et de suspendre ou d'abandonner le projet.

Cette décision peut sembler étrange car les éoliennes, vues de la digue ne représentaient que quelques centimètres. Le dossier Total (250 millions d'euros d'investissements) était enterré : sans étude préalable, le gouvernement concluait que ce projet « nuirait au tourisme de Knokke ». Le vent politique avait déjà tourné : l'Ostendais Johan Vande Lanotte avait décidé que tous les investissements éoliens se concentreraient sur le Thorntonbank, un banc de sable à plus de vingt kilomètres de la côte.

Pour certains cette décision est inacceptable car visiblement, les intérêts de quelques particuliers semblent l'emporter largement sur l'intérêt général. Un paradoxe est présent : les citoyens sont de plus en plus préoccupés par l'état de leur santé et de l'environnement dans lequel ils vivent, mais ils refusent aussi bien souvent les choix pratiques et politiques qui peuvent les faire sortir des impasses dans lesquelles ils se trouvent.

# Chapitre 3. Les différentes technologies

# 3.1. L'énergie éolienne offshore

# 3.1.1. Définition de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est l'énergie du vent et plus spécifiquement, l'énergie tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur ad hoc : éolienne, moulin à vent, tour à vent. L'énergie éolienne tire son nom d'Éole, le nom donné par les anciens Grecs au dieu censé produire le vent. Elle peut être utilisée de deux manières :

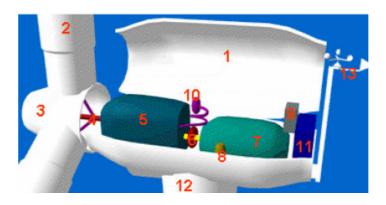
- O Transformation en énergie mécanique : le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (voilier), pour pomper de l'eau (moulins de Majorque, éoliennes dans les champs pour abreuver le bétail) ou pour faire tourner une meule.
- Transformation en énergie électrique : l'éolienne est accouplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu (installation reliée à des batteries) ou alternatif (installation reliée au secteur).



Figure 8 : Eoliennes offshore (Source Apab, 2004)

C'est cette deuxième transformation qui nous intéresse plus particulièrement. En effet, l'éolienne offshore va alimenter le réseau en courant alternatif. Les caractéristiques des éoliennes offshore sont semblables à celles des éoliennes onshore. Une éolienne est caractérisée par sa puissance [W], sa hauteur de mât [m] et son diamètre [m]. Une éolienne est également composée d'une nacelle comprenant la génératrice. Les pâles sont reliées à

celle-ci par un rotor. C'est à cet endroit qu'est fabriquée l'électricité. La nacelle peut également contenir un frein, une boite de vitesse, différents contrôleurs, un gouvernail pour orienter l'éolienne,...



- 1) Nacelle
- 2) Pale de rotor
- 3) Moyeu
- 4) Axe

- 5) Boîtier de transmission
- 6) Axe
- 7) Alternateur
- 8) Mécanisme d'orientation
- 9) Electronique
- 10) Système
- hydraulique 11) Refroidissement
- 12) Mât
- 13) Capteur anémométrique

Figure 9 : Composition d'une éolienne (Source Turbowinds, 2003)

La puissance d'une éolienne est déterminée par la formule suivante :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho S v^3$$

où  $\rho$  représente la densité de l'air, S la surface couverte par les pâles de l'éolienne et v la vitesse du vent. Etant donné que la puissance est proportionnelle au cube de la vitesse du vent, il est très important d'étudier les caractéristiques du vent sur le site où les éoliennes doivent être implantées. La puissance transmise au rotor est déterminée par la formule suivante :

$$P_{rotor} = C_p P_{vent}$$

Où  $C_P$  est le coefficient de puissance de l'éolienne. Il caractérise le pourcentage de puissance extrait du vent et fournit effectivement à l'éolienne. C'est un facteur fonction de  $\lambda$  et de  $\theta$ , ces deux derniers paramètres étant respectivement le rapport de la vitesse en bout de pâle à la vitesse du vent et l'angle d'inclinaison des pâles (pitch). Sa valeur maximum est définie par la limite de Betz<sup>7</sup> et vaut approximativement 0.6. La puissance maximale de l'éolienne est définie par la génératrice. En effet, si le vent souffle trop fort et que le rotor

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Betz démontre en 1919 que la puissance théorique maximale récupérable par un capteur éolien est égale à 16/27 de la puissance incidente du vent qui "traverse" l'éolienne. Il affirme de plus que cette limite sera atteinte lorsque le capteur éolien freinera le vent à 1/3 de sa vitesse en amont de l'éolienne. Bien entendu, la puissance incidente du vent dépend de la surface que le capteur éolien propose au vent, de la vitesse du vent et de la masse volumique de l'air.

tourne trop vite, la puissance transmise du vent à la génératrice est trop élevée et celle-ci peut griller. On bloque alors l'éolienne. Les courbes caractéristiques des éoliennes sont du type suivant :

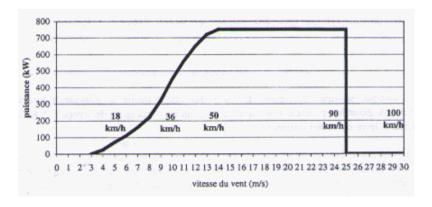
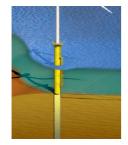


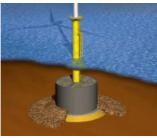
Figure 10 : Courbe caractéristique d'une éolienne de 750 kW (Source : Manicore, 2001)

La vitesse du rotor est définie bien évidemment par le vent (vitesse et orientation) mais également par le comportement aérodynamique des pâles. Le calage des pâles est l'angle entre la pâle et le plan de rotation. Sur certaines éoliennes, il peut être modifié par rotation de la pâle autour de son axe longitudinal pour rechercher le bon angle d'incidence entre la pâle et le vent apparent. Cette solution est plus complexe mais procure un meilleur rendement et une meilleure régulation.

La conversion de l'énergie mécanique en électricité s'effectue à l'aide d'un générateur asynchrone ou synchrone associé alors à un convertisseur de puissance pour découpler la fréquence du réseau de la vitesse de rotation. Si l'éolienne est connectée au réseau, le courant doit être en phase avec celui-ci et il faut limiter les perturbations en fréquence et en tension. La multiplication de la vitesse de rotation du rotor est réalisée soit par un système d'engrenages, soit par une attaque directe avec générateur synchrone multipolaire.

Les éoliennes sont fixées au fond par un seul pieu (« monopile » ou « monopieu ») ou soutenues par un poids massif. Les fondations peuvent également être tripodes ou quadripodes et sont exploitables jusqu'à 20 m de profondeur. Une nouvelle génération d'éoliennes à base flottante est également en cours de développement et permettra d'implanter des champs jusqu'à une profondeur de 50 m. Elles seront décrites dans les perspectives.







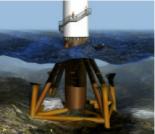


Figure 11 : Fondations monopieu, avec un poids massif, tripode, quadripode (Source : Secrétariat Général de la Mer, 2002)

Les éoliennes sont dotées de dispositifs perfectionnés de contrôle, de pilotage, de surveillance et de télémaintenance. Les parcs peuvent comprendre des installations destinées à faciliter les interventions par la mer, voire des plates-formes pour accès par hélicoptère.

Les éoliennes produisent du courant alternatif à une tension de l'ordre de quelques kV. Elles sont normalement reliées entre elles par des câbles sous-marins (ensouillés ou non). La tension est ensuite élevée (entre 20 kV et plusieurs centaines de kV) par un transformateur triphasé. Le tout est ensuite relié au réseau par un ou plusieurs câbles sous-marins généralement ensouillés. Pour connecter au réseau un parc éolien, il est nécessaire de disposer :

- o d'un point de raccordement susceptible d'accueillir cette production
- o d'un réseau capable de supporter la puissance maximale produite, mais aussi les variations de puissance liées aux variations de la vitesse du vent.

La surface au sol minimale nécessaire avec les technologies actuelles est de l'ordre de 0,5 km²/ 2 MW (soit 250 km²/1000 MW, ou 4 MW/km²), mais on peut estimer qu'elle tendra à terme vers 0,5 km²/5 MW (soit 100 km²/1000 MW, ou 10 MW/km²). La surface réellement occupée sur le fond (fondations, piliers et base des éoliennes, installations annexes) ne dépasse pas quelques pour cent de la surface totale des parcs.

### 3.1.2. Avantages et inconvénients

Il est clair que l'énergie éolienne présente de nombreux avantages. C'est une énergie propre, qui ne produit aucun déchet, ni aucune émission dans l'atmosphère, si ce n'est les déchets ou émissions liés à sa construction, son installation ou sa maintenance. Ses avantages sont assez évidents et généralement bien connus.

Cependant, les éoliennes présentent également des désavantages, moins évidents et moins connus, ils s'exposeront dans ce qui suit.

Les éoliennes ne sont pas utilisables en permanence du fait de l'inconstance du vent. Il faut donc les coupler soit à un dispositif de stockage de l'énergie, soit à une autre source d'énergie, soit à un réseau très étendu (à l'échelle de l'Europe par exemple). Ce qui provoque une sensible augmentation des coûts de l'énergie et peut, de ce fait, changer le caractère écologique de l'énergie éolienne. En effet, le procédé ne produit pas à la base de gaz à effet de serre (GES) dans son application simple et peut partiellement remplacer une source d'énergie plus polluante, telle que les centrales thermiques au charbon ou les centrales nucléaires. Toutefois, l'éolienne, produisant de façon intermittente, doit donc être utilisée conjointement avec d'autres sources d'énergie sur le réseau électrique pour alimenter des foyers qui demandent continuellement de l'énergie. Il s'agit aujourd'hui souvent d'une génératrice thermique principalement (charbon, gaz ou fioul), prête à prendre le relais en cas de diminution du vent.

Certains experts font remarquer que c'est lors du démarrage ou d'un changement brusque de régime, que les générateurs thermiques émettent leur maximum de gaz à effet de

serre (GES), ce qui peut rendre le couple éolienne - centrale thermique plus polluant que la centrale thermique seule. Ceci n'est évidemment pas systématique mais dépend du taux de charge de l'éolienne. Notamment, on remarque que le Danemark et l'Allemagne, pays pourtant pionniers dans l'éolien, n'ont pas réduit leurs émissions de gaz à effet de serre.

La capacité de production de la source d'énergie de « réserve », par exemple une centrale thermique, doit en ce cas être équivalente à celle de l'éolienne puisqu'elle doit pouvoir la remplacer complètement en cas d'absence de vent. Il faut donc, par exemple, avoir 1 MW grâce à la seule centrale thermique si l'éolienne a une capacité de 1 MW. Une éolienne peut cependant être compensée par une autre éolienne si on suppose que le vent est rarement nul sur tout le territoire mais le problème n'est cependant pas à négliger. De plus, l'amélioration des performances de l'éolien et le couplage à des sources d'énergies complémentaires comme le gaz qui seraient plus propres pourraient réduire cet effet fâcheux

Les très rapides variations de la capacité de production amènent aussi des difficultés de gestion de la production : les centrales électriques classiques sont longues à démarrer voire très longues pour les centrales nucléaires. La capacité de production disponible non utilisée doit en permanence être capable de combler une baisse de la production éolienne. La production hydraulique sert usuellement à ajuster la production à la charge du réseau, mais sa capacité est limitée.

La localisation des éoliennes est dépendante de la ressource (le vent) et ne correspond généralement pas aux zones de consommation. De plus, le caractère dispersé de la majorité des implantations amènerait en cas de fort développement de l'éolien à renforcer le réseau de transport électrique entre les zones de production éolienne et les zones de consommation. Ce renforcement du réseau est très coûteux et provoque les nuisances classiques (visuel, sonore, électromagnétique) des lignes à haute tension donc pose des problèmes semblables à ceux qu'induit le nucléaire.

Malgré ces désavantages, l'éolienne reste néanmoins une source d'énergie très intéressante surtout dans le cadre du développement durable. Les avantages cités ci-dessus couvrent certainement les inconvénients présentés, toutefois ces derniers ne doivent pas être négligés afin de permettre un développement optimal.

## 3.1.3. Comparaison avec l'éolien onshore

Il est également intéressant de comparer les avantages que présentent les éoliennes offshore par rapport à celles onshore afin de justifier leur développement et leur implantation qui sont beaucoup plus coûteux. Ils sont les suivants :

- O La mer offre des sites de plus grandes étendues, aptes à recevoir de grands projets.
- O Le vent est plus fort et plus constant en mer que sur terre, ce qui entraîne une plus grande productivité. Des augmentations de 5 à 45% ont été suggérées par plusieurs études.

- o Il y a moins de turbulences, ce qui permet une meilleure utilisation des éoliennes et une réduction du chargement à la fatigue. La stabilité plus grande de l'atmosphère en mer a cependant un inconvénient. Le sillage turbulent produit par les éoliennes elles-mêmes sera dissipé plus lentement que pour des éoliennes terrestres comparables. Cela entraîne un espacement plus grand entre les éoliennes offshore par rapport à celles sur terre. L'espacement choisi doit réaliser un compromis entre les gains d'une turbulence réduite due aux éoliennes et les surcoûts liés à de plus grandes longueurs de câble sous-marin.
- O La mer étant moins rugueuse que les parties terrestres, cela implique une faible augmentation de la vitesse du vent avec la hauteur. Cela signifie que la hauteur du moyeu peut être diminuée pour obtenir la même vitesse du vent ou réciproquement que la vitesse du vent sera supérieure pour une hauteur donnée du moyeu.

Par contre, l'éolien offshore implique une installation et un entretien plus difficile ainsi qu'une interférence avec les autres usagers de la mer. Le coût du ralliement au réseau électrique terrestre représente un coût également très important. La structure offshore ne doit pas seulement être conçue pour résister à des vents extrêmes, comme pour les éoliennes à terre, mais aussi aux forces dues aux vagues extrêmes et, pour certains sites, à la glace également. Devant résister à ces différents efforts, la structure doit être de plus calculée de manière à ce que sa fréquence propre (résonance) ne corresponde pas à la fréquence des efforts du vent et des vagues. Si la fréquence propre de la structure est égale à celle des fréquences liées à l'environnement, les vibrations résonantes de la structure peuvent augmenter jusqu'à sa rupture.

### 3.1.4. Potentiel

Ce sont surtout les états côtiers de la mer Baltique, de la Mer du Nord, du Nord de la façade Atlantique (à partir de la Bretagne), et de la côte française méditerranéenne qui jouissent d'un potentiel vent intéressant. La Belgique en fait donc partie.

Mais pour être exploitable, le site marin doit également répondre aux critères suivants :

- o Être relativement côtier et présenter de faibles profondeurs d'eau au regard des techniques actuelles (entre 10 m et 20 m ; 50 m dans quelques années).
- O Avoir un arrière pays déjà équipé d'un réseau électrique acceptant l'énergie produite par ce parc, puis son transport et son évacuation vers les lieux de consommation
- O Ne pas avoir un taux d'occupation trop important de son espace marin, par des activités civiles ou militaires, marines ou aériennes, professionnelles ou non, ..., certaines de ces activités pouvant être partiellement ou totalement incompatibles avec un parc éolien.

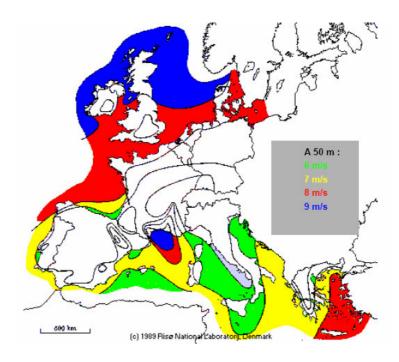


Figure 12 : Evaluation de la ressource éolienne (Source RISOE, 2002)

Les premières fermes offshore ont été mises en service au début des années 1990. A la fin août 2004, 331 éoliennes étaient implantées en mer (toutes en Europe), pour une capacité cumulée de 612MW et des milliers de mégawatts sont en projet. (Ifremer)

Les ressources offshore dans la seule mer du Nord permettraient de couvrir trois fois la consommation électrique des pays qui la bordent selon une étude commandée au German Wind Energy Institut (DEWI). Le potentiel global de la ressource éolienne offshore pour l'Europe entière est évalué à 570 GW, soit environ une productivité de 1845 TWh annuels. (Survey Energy Resources, World Energy, 1998). La consommation européenne actuelle étant d'environ 3000 TWh, ce potentiel ne doit pas être négligé. D'importants investissements doivent être réalisés et il n'est certainement pas envisageable d'exploiter la totalité du potentiel car, comme on le verra ci-dessous, l'impact avec les autres usagers de la mer est présent. Cependant, l'exploitation d'un dixième de cette ressource en Europe permettrait de couvrir plus de 6% de la demande en électricité ce qui n'est pas négligeable, d'autant plus qu'on ne tient pas compte de l'éolien onshore dans ce cas.

## 3.1.5. Impacts environnementaux

L'implantation d'un parc éolien est susceptible de produire des impacts sur le milieu naturel et sur les activités humaines. Ces effets sont généralement vus sous un angle négatif. Les parcs éoliens eux-mêmes et les installations associées (câbles, plates-formes, postes de transformation) mobilisent l'espace en mer : espace aérien, surface, colonne d'eau, fond de la mer, mais aussi à terre : raccordements, câbles. La présence de mâts, de pièces importantes en rotation, de câbles sous haute tension peut être cause de dangers, de même que les interférences électromagnétiques potentielles. La construction, l'exploitation ou le

démantèlement des parcs peuvent être cause de perturbations du sol, du sous-sol et de la colonne d'eau (bruits, vibrations, modifications locales des conditions hydrodynamiques et de la dynamique sédimentaire...).

Il ne faut pas non plus oublier que "rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme". L'énergie puisée par les éoliennes correspond à une énergie d'échange thermique, de convection. Une implantation massive d'éoliennes peut potentiellement avoir des conséquences sur le climat local notamment en aval des éoliennes par rapport au sens des vents dominants. Il n'est pas simple d'évaluer ces inconvénients.

Mais il existe aussi des effets positifs, pour le moment surtout potentiels, notamment le développement d'activités connexes (plongée, tourisme, aquaculture au large...) ou encore la constitution de « sanctuaires » ou de zones favorables à la gestion des ressources halieutiques (récifs artificiels).

Afin d'évaluer au mieux les effets potentiels d'un parc éolien, une étude d'impact doit être réalisée. Celle-ci doit contenir :

- O Une analyse de l'état initial du site et de son environnement.
- O Une analyse des effets directs et indirects, temporaires et permanents du projet sur l'environnement, et en particulier sur la faune et la flore, les sites et paysages, le sol, l'eau, l'air, le climat, les milieux naturels et les équilibres biologiques, sur la protection des biens et du patrimoine culturel et, le cas échéant, sur la commodité du voisinage (bruits, vibrations, odeurs, émissions lumineuses) ou sur l'hygiène, la santé, la sécurité et la salubrité publique.
- O Les raisons pour lesquelles, notamment du point de vue des préoccupations d'environnement, parmi les partis envisagés qui feront l'objet d'une description, le projet présenté a été retenu.
- Les mesures envisagées par le maître de l'ouvrage ou le pétitionnaire pour supprimer, réduire et, si possible, compenser les conséquences dommageables du projet sur l'environnement et la santé, ainsi que l'estimation des dépenses correspondantes.
- O Une analyse des méthodes utilisées pour évaluer les effets du projet sur l'environnement mentionnant les difficultés éventuelles de nature technique ou scientifique rencontrées pour établir cette évaluation.

Afin de faciliter la prise de connaissance par le public des informations contenues dans l'étude, celle-ci doit faire l'objet d'un résumé non technique. Seuls les deux premiers points sont présentés dans ce travail, les trois autres étant trop dépendants d'un projet particulier.

L'analyse de l'état initial de l'environnement dans le cadre d'éoliennes offshore doit tenir compte du milieu physique, du milieu naturel, du milieu humain, du paysage et patrimoine. Par milieu physique, entendons l'hydrodynamique marine, les courants, la houle (vitesse, direction, amplitude) et les fonds marins (sédimentologie, géomorphologie). Pour le milieu naturel, il convient d'étudier les paramètres physico-chimiques et biologiques de l'eau, le peuplement benthique de l'eau, les poissons, les cétacés et les oiseaux. Tout comme pour les projets terrestres, les observations doivent porter sur un

cycle biologique annuel. L'aire d'investigation de tels projets doit être suffisamment grande, notamment pour percevoir l'utilisation de l'espace par les mammifères marins, les poissons, les oiseaux marins... en tenant compte de la fonctionnalité des écosystèmes (reproduction, alimentation, migration). Pour le milieu humain, cela consiste principalement à caractériser les usages et utilisations du milieu marin (transport, navigation, pêche, pisciculture, conchyliculture, loisirs nautiques, gestion d'aires marines protégées...). Il faut également tenir compte des zones marines réglementées, des sémaphores, des servitudes radioélectriques, aéronautiques,... L'analyse paysagère doit s'attarder sur la zone terrestre et la recherche de liens pouvant guider le projet de paysage. Quels sont les arguments paysagers pour concevoir l'implantation et l'agencement des éoliennes ? Quels sont les points forts de la côte que le projet éolien doit prendre en considération ?

Il faut ensuite passer à l'analyse des effets. Ces effets doivent être étudiés au cas par cas car ils dépendent de l'emplacement du site. Les paragraphes suivants reprennent la méthodologie de l'étude de ces effets ainsi que des exemples issus de l'étude d'impact réalisée pour l'implantation des éoliennes au large de Zeebrugge, site sur lequel nous avons déjà discuté dans le cadre du droit de la mer.

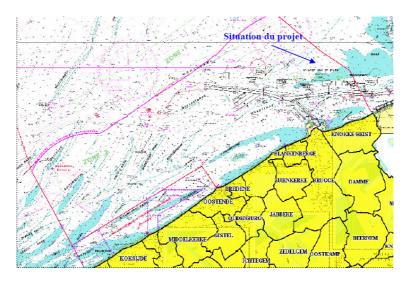


Figure 13: Situation du projet (Source: Electrabel, 2001)

Ce parc offre une puissance de 100 MW, mais il est conçu pour être étendu jusqu'à 400 MW à un stade ultérieur. L'emplacement qui a été retenu pour ce projet se situe dans les eaux territoriales belges, au nord du Vlakte van de Raan.

### Faune et flore marine

Les effets prévisionnels sur le milieu benthique, l'évolution de la ressource halieutique, les risques de perte de fonctionnalité des habitats, la modification de l'utilisation de l'espace par les cétacés doivent être analysés. L'existence du parc éolien peut avoir un effet sur la ressource en poisson en s'implantant directement en zones de frayères, d'alimentation... ou indirectement en empêchant ou perturbant les déplacements des populations. A l'inverse, le parc éolien peut jouer un rôle d'enrichissement du milieu par l'effet récif artificiel de sa partie immergée. L'étude d'impact doit mettre en évidence les interactions entre les éoliennes et la ressource en poissons.

L'étude d'impact de Zeebrugge tire plusieurs conclusions. La flore est presque inexistante sur le site. La faune présente est une faune typique des fonds sablonneux. Celleci se rencontre dans la zone côtière de toute la boucle sud de la mer du Nord et ne présente de ce fait pas un intérêt biologique particulier du point de vue de la biodiversité. Le site représente cependant une zone importante d'alimentation, de frayère et de développement juvénile des alevins de poissons plats et crevettes. Aucun mammifère marin n'a été recensé. Voila pour ce qui est de la situation initiale.

A la suite de l'aménagement du parc à éoliennes, une partie du fond marin sera enroché tout autour de la base des monopiles. La faune sédentaire benthique disparaîtra localement. C'est le seul effet négatif significatif et permanent pour la faune durant la phase d'aménagement. En effet, cette fondation a un effet positif pour le reste de la faune et la flore en servant de récif naturel. Une végétation de vagues et une faune d'invertébrés peuvent venir s'y implanter. Ce récif peut également créer un habitat pour les espèces propres aux côtes rocheuses comme le tourteau, le labre ou en encore le tacaud. La zone initiale d'alimentation est non seulement conservée mais également renforcée. Il s'agit de l'incidence la plus importante et elle est considérée comme positive, significative et permanente. Elle recouvre l'incidence négative évoquée ci-dessus. Le résultat net de l'implantation d'éoliennes doit par conséquent être considéré comme positif pour la faune et la flore. Une lacune importante est cependant à déplorer au niveau des connaissances sur l'incidence des vibrations sous-marines sur la faune marine pendant le fonctionnement du parc à éoliennes.

Dans un contexte plus général, aucune étude n'a démontré d'impact important sur les mammifères marins, poissons, crustacés ou coquillages. Des études plus spécifiques aux impacts dus aux vibrations et champs électriques devraient être réalisées.

#### Avifaune

Même remarque qu'au point précédent, les effets sur les oiseaux pélagiques et migrateurs doivent être analysés. Pour une évaluation exacte de l'impact, il convient de tenir compte pour chaque espèce du nombre, de la dissémination internationale, de la sensibilité aux perturbations et de la prédisposition aux collisions.

La première étape consiste au recensement des espèces présentes sur le site. Dans le cas de Zeebrugge, il s'agit principalement de grandes espèces de goélands, à savoir le goéland cendré, le goéland brun, le goéland argenté et le goéland marin, le plongeon catmarin, le grèbe, la mouette pygmée et la sterne.

La dissémination des goélands est en grande partie liée à la présence de bateaux de pêche. Etant donné que les bateaux vont éviter le parc à éoliennes, la dissémination des goélands va changer aussi. De plus, ces espèces ne jouissent pas d'un statut de protection international et sont présentes en grand nombre partout dans le monde. L'impact est alors jugé modérément négatif.

Le plongeon catmarin et le grèbe sont très sensibles aux perturbations. Il faut donc s'attendre à ce que ces espèces évitent en grande partie le parc. L'incidence doit alors être jugée comme très négative. La sensibilité aux perturbations de la mouette pygmée est très

peu connue. Par comparaison à d'autres espèces de mouettes, une incidence très négative n'est pas à exclure.

Les sternes fréquentent peu le site qui ne semble pas remplir une fonction importante pour cette espèce. Il s'agit plutôt d'une zone temporaire d'alimentation au printemps et en automne. L'incidence peut être jugée comme modérément négative.

Le nombre de collisions parmi les plongeons catmarins, les grèbes, les mouettes pygmées et les sternes sera peu élevé car ces espèces auront tendance à éviter le site. Par contre, pour les goélands, le risque est plus élevé car le site se situe entre leur lieu de repos et leur lieu d'alimentation. Ils traverseront alors le parc au crépuscule et à l'aube. Le nombre de victimes est cependant difficile à évaluer.

Pour les oiseaux ayant l'habitude de traverser le site pendant la migration, le parc peut former une barrière importante. Il est possible de compenser partiellement cet effet de barrière en réservant suffisamment d'espace entre les groupes d'éoliennes. Sur base des connaissances actuelles, il n'est cependant pas possible d'établir une estimation précise de l'incidence sur les oiseaux de passage car les cartes de migration en mer ne sont pas assez précises.

Les effets de la pollution électromagnétique sur l'avifaune sont mal connus (perturbations potentielles des facultés d'orientation, en particulier des oiseaux migrateurs), et nécessitent des études spécifiques. Les études menées en Europe du Nord semblent montrer des impacts généralement faibles en dehors des trajets de migration et des abords immédiats des zones de nidification, mais ces conclusions générales sont à nuancer, car la variabilité peut être très grande d'un site à un autre (espèces présentes, habitats, conditions, vulnérabilité) : les impacts sont donc à évaluer spécifiquement pour chaque projet.

Le risque pour les installations éoliennes dû à la présence éventuelle d'oiseaux est nul.

#### Nuisances sonores

L'installation d'un projet éolien en mer permet de s'affranchir, a priori, des éventuelles nuisances sonores pour les humains, du fait de l'absence de riverains à proximité immédiate. Cependant, les nuisances éventuelles liées aux équipements à terre (atterrage, poste de livraison...), ainsi que la propagation du son en milieu aquatique sont toujours à considérer. Lors de l'étude d'impact, ce sont les niveaux de bruits ambiants dans l'eau, à la surface et au-dessus du niveau de la mer qui sont pris comme référence car il n'existe pas de directives applicables au cas des éoliennes.

Dans le cas de Zeebrugge, il ressort qu'au-delà d'une zone de 200 m des turbines éoliennes, le niveau de bruit ambiant sous l'eau est plus élevé que le bruit émises par cellesci et il n'y a donc pas d'impacts. Au dessus de la surface de l'eau, le turbines sont audibles jusqu'à environ 3-5 km dans des conditions moyennes venteuses. Mais généralement le bruit des éoliennes reste limité à un niveau inférieur au bruit de fond du battement du déferlement.

#### **Erosion**

La phase de construction va entraîner des matières en suspension aussi bien pour la pose de l'éolienne que pour le câble. C'est aux endroits limoneux et vaseux qu'il y en aura le plus. Celles-ci produisent un accroissement de la turbidité de l'eau, ce qui peut influencer certains organismes sur le fond de la mer et dans la colonne d'eau en conséquence d'une pénétration moindre de la lumière et de la présence de matières abrasives dans l'eau. Cette augmentation reste cependant limitée si l'exécution des travaux est soigneuse en comparaison aux variations naturelles à la suite des tempêtes ou des travaux de draguage.

Durant la phase d'exploitation, la présence des éoliennes va perturber les courants, les vagues ainsi que le transport des sédiments. Ces perturbations sont la cause d'une érosion supplémentaire du fond de la mer autour des pieux. L'étendue et la profondeur de ces poches d'érosions sont difficilement prévisibles.

Dans le cas d'un éventuel démantèlement, l'enlèvement des câbles de transport provoquera une nouvelles fois un accroissement temporaire de la turbidité.

### Paysage

Le projet de paysage doit être guidé par les caractéristiques du littoral terrestre et avant tout construit autour des structures paysagères terrestres pour ne pas banaliser les éoliennes et construire un nouveau paysage en lien avec le précédent. La dimension des structures est telle que l'implantation d'un parc éolien en mer induit de fait la création d'un nouveau paysage. Chaque site doit faire l'objet d'une étude spécifique, tenant compte des contraintes techniques fortes de géométrie et d'implantation, pour aboutir à la création d'un paysage de qualité. Les options restent ouvertes (choix de couleurs très contrastées, ou au contraire recherche d'une intégration poussée), et il ne paraît ni possible ni souhaitable d'imposer un parti général. Le choix de limiter le nombre des parcs devrait toutefois permettre de consacrer à ces études un potentiel suffisant pour chaque site, et notamment de conduire des simulations réalistes d'impact visuel dans des conditions variables. De nombreuses études ont en outre démontré qu'il faut s'éloigner des terres au minimum de huit kilomètres pour limiter l'impact paysager.



Figure 14: Impact paysager (Source: Electrabel, 2001)

L'étude d'impact sur le champ éolien de Zeebrugge avance que le site se trouve dans le prolongement de la zone qui offre le meilleur rendement économico-spatial, grâce à quoi il est à espérer que le projet générera une dynamique spatio-sociétal accrue dans la zone côtière orientale. Pour ce qui est de l'incidence sur le paysage proprement dit, on remarquera que l'impact dépend du point d'observation du projet. Le site étant situé à 12 kilomètres de la côte, l'incidence est considérée comme limitée. De plus, le ciel essentiellement gris bleu observé une majeure partie de l'année peut être avancé comme condition annexe pour peindre les turbines dans cette couleur afin de fondre le éoliennes dans l'horizon.

### 3.1.6. Impacts sociaux – Impacts sur les activités humaines

### Navigation

On peut distinguer la navigation commerciale et la navigation liée aux autres activités. Si la navigation commerciale utilise le plus souvent des routes bien définies, la plaisance et surtout la pêche occupent une grande partie de l'espace libre, essentiellement au voisinage du littoral. Les contraintes sur la pêche seront étudiées par après.

On peut estimer que les contraintes sur la navigation commerciale peuvent être très réduites, à condition d'éviter les routes les plus fréquentées, en particulier les zones de navigation resserrées comme les approches de ports, de dispositifs de séparation de trafic, de terminaux ou les zones de mouillage, et d'éviter la multiplication des parcs. Les contraintes pour la plaisance peuvent être acceptables à condition d'éviter les zones de forte concentration (« bassins de plaisance ») et de s'éloigner de la côte (la navigation de plaisance décroît fortement à mesure qu'on s'éloigne de la côte). Les parcs éoliens peuvent d'ailleurs constituer un centre d'attraction pour les plaisanciers, en particulier sur les façades maritimes monotones.

La question de principe de la navigation à l'intérieur des parcs (entre les éoliennes) reste à étudier : s'il est évident que les parcs doivent être interdits à la navigation commerciale, il faut considérer sérieusement l'autorisation aux pêcheurs et plaisanciers, ce qui faciliterait certainement l'acceptation des parcs. Parmi les risques potentiels liés à la sécurité maritime, il faut évoquer le problème que pourrait poser une pollution dans un parc éolien. Les risques pour les parcs éoliens eux-mêmes sont essentiellement liés aux collisions avec la navigation commerciale, et dans une moindre mesure avec les navires de pêche. En dehors des zones fréquentées, ces risques peuvent être minimisés par un balisage et une cartographie adaptés. Il est probable toutefois que la présence d'un parc éolien entraînera un accroissement des besoins de surveillance et de police (notamment du fait de la fréquentation inévitable par des embarcations de loisir, surtout pour les parcs proches de la côte).

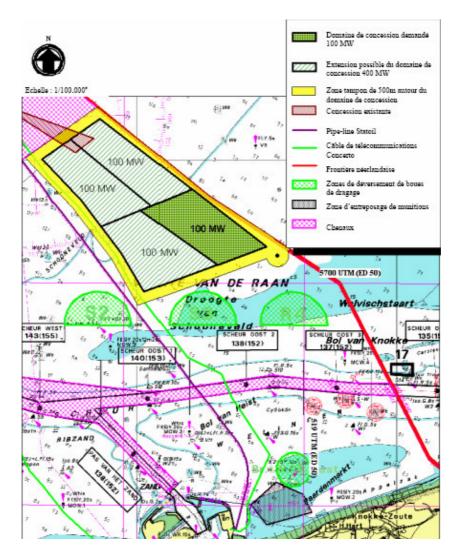


Figure 15 : Interaction avec les activité humaines (Source : Electrabel, 2001)

#### Pêche

Les interactions entre les activités humaines utilisant la ressource en poisson et l'implantation du projet éolien doivent être évaluées : perte de la surface exploitable, impact sur les ressources halieutiques, interférence du parc avec l'activité de pêche selon la nature de l'activité de pêche, ...

Si les exigences de sécurité sont respectées, l'éolien n'est a priori pas incompatible avec le maintien de certains types de pêche (hors période d'installation). Toutefois, il convient d'éviter les zones traditionnelles de pêche (en particulier les zones exploitées intensivement), d'étudier avec les pêcheurs tout projet d'affectation de zones à l'implantation de parcs éoliens (concertation, enquête publique), et d'envisager éventuellement des compensations. Il est à noter à cet égard qu'une partie des travaux de maintenance sera réalisée par la mer, et pourrait marginalement employer les compétences de marins connaissant bien la zone et ses caractéristiques.

Dans le cas de Zeebrugge, le site semble présenter une importance économique pour la pêche à la crevette principalement. Environ 10 % du site seraient perdus à la suite de

l'aménagement du parc à éoliennes, ce qui représente une incidence négative, d'autant plus qu'elle présente un caractère permanent. Cependant, si le parc est fermé à la pêche, il peut devenir une zone de frayère et de développement juvénile en aménageant les enrochements à la base des monopiles sous forme d'éléments récifaux artificiels. Ceci permettrait une gestion durable des ressources en poissons et en crevettes. Les populations de poissons devraient alors augmenter et suite à cela, le nombre de prises également.

### Communication - Détection

Les problèmes classiques à terre ne se posent a priori pas (interférences avec la radiotélévision hertzienne, ou les communications : téléphonie mobile). La propagation de la VHF<sup>8</sup> marine mérite par contre d'être étudiée. Hormis quelques cas particuliers, qui correspondent à des servitudes et qu'il doit être facile d'éviter (interférences avec faisceaux hertziens, implantation à proximité de radar de contrôle de la navigation....), les problèmes principaux semblent liés aux interférences potentielles avec les radars de navigation. Même si les premiers travaux ne laissent pas apparaître de problèmes insurmontables (la détection à travers un parc éolien resterait possible, et la signature des éoliennes serait assez importante pour en permettre un repérage facile, mais assez réduite pour ne pas perturber l'emploi des radars classiques), des études plus complètes sur des cas réels sont nécessaires.

#### Activité militaire

Un certain nombre d'activités militaires (hors navigation maritime) immobilisent actuellement des zones notables. La densité (temporelle et spatiale) d'utilisation de ces zones est généralement faible. Si certaines sont complètement incompatibles avec des parcs éoliens (zones de tir, zones de vol à très faible altitude...), d'autres peuvent sans doute être partagées, ou dans le temps (limitation des périodes de maintenance), ou dans l'espace. Des études pourraient être menées si nécessaire pour réexaminer les zones d'activité militaire (en particulier en fonction des restructurations de la défense) et statuer sur leur maintien, ou définir des modalités d'utilisation conjointe. Le parc éolien de Zeebrugge par exemple est implanté à plus de 25 kilomètres de la zone militaire de Koksijde et aucune interférence n'est prévue.

### Navigation aérienne

Les éoliennes sont susceptibles de culminer à plus de cent mètres au-dessus du niveau de la mer. Elles constituent donc des obstacles potentiels à la navigation aérienne. Toutefois, si l'on évite les zones critiques (approches d'aéroports côtiers, zones d'écopage, etc.), et qu'existent un balisage et une cartographie adaptés, les interférences sont sans doute faibles. En ce qui concerne la côte belge, il faut distinguer la zone de vol à basse altitude qui sert d'exercice pour les hélicoptères et le couloir de décollage et d'atterrissage de l'aéroport d'Ostende. Le site du parc éolien est situé hors de la zone de vol à basse altitude et n'a, de ce fait, aucune influence sur l'exercice des hélicoptères. Aucun problème non plus en ce qui concerne l'aéroport d'Ostende car les trajectoires de vol ne passent pas au-dessus du parc et

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> Very High Frequency. Bande de radiofréquences comprise entre 30 et 300 MHz.

de plus, les avions doivent voler à une altitude minimale de 150 m à plus de 10 kilomètres de la piste. Le site se trouve à plus de 25 kilomètres, aucun problème n'est donc à craindre.

### Pipe-lines et câbles

Hors phases de construction et de démantèlement, les risques sont très faibles pour les câbles existants, bien inférieurs en tout état de cause à ceux liés à la navigation (ancres) et surtout à certains types de pêche (chalutage, dragage), activités qui devraient être limitées ou interdites dans le périmètre des parcs éoliens (existence de câbles de transport d'énergie non ensouillés), ou au voisinage des câbles de liaison au rivage.

#### Sécurité des installations

Divers scénarios d'accidents doivent également être étudiés afin de connaître l'impact possible sur l'environnement. Les accidents peuvent provenir d'une collision entre une éolienne et un bateau ou un avion, de la rupture d'une pale, de l'impact de la foudre, d'un vent ou d'une houle extrême ou encore d'un accident de travail pendant l'entretien de l'installation. Ces accidents peuvent avoir des conséquences dommageables dans le cas d'une collision avec un bateau transportant une cargaison dangereuse. Cette collision peut aussi se produire avec des fragments d'éoliennes si cette dernière a été endommagée. Les collisions avec les avions ainsi que la défaillance structurelle complète d'une turbine peuvent avoir également de graves conséquences pour l'environnement.

Les collisions avec les bateaux et les avions ne doivent pas être considérées comme des scénarios probables si toutes les mesures de sécurité sont appliquées. Par contre, la probabilité des défaillances structurelles complètes ne doit pas être négligée. Pour déterminer les impacts possibles sur l'environnement, une liste des divers composants de l'éolienne est à dresser. Il s'agit généralement d'acier, de résine époxyde renforcée à la fibre de verre, de cuivre, d'aluminium et d'huile. Ce sont surtout les huiles présentes dans les turbines qui peuvent causer des dommages, les autres matériaux étant assez facilement récupérables.

#### **Autres**

D'autres paramètres doivent encore être pris en compte. Des zones d'exploitations du sable, de déversement des boues de dragage ou encore archéologiques (si des épaves ayant une valeur écologique ou archéologique importante sont présentes sur le site) peuvent entrer en concurrence avec le parc éolien.

#### **Emplois**

81% des emplois sont dans la construction des machines et seulement 19% dans l'installation et la maintenance.

L'industrie de l'éolien a déjà créé 50 000 emplois en Europe, en quelques années de développement et sa croissance annuelle a atteint 36% en Europe depuis 1995. La filière éolienne permet de créer de 15 à 19 emplois par MW de puissance installée. En France, par exemple, le potentiel technique éolien est de 42 500 MW, c'est le deuxième d'Europe après

celui de la Grande-Bretagne. L'éolien pourrait alors représenter plus de 600 000 emplois en France à lui seul si tout ce potentiel était exploité.

# 3.1.7. Impacts économiques

Il est indispensable pour la viabilité d'un projet de savoir s'il est économiquement rentable. Pour ce faire, une évaluation des coûts de références doit être réalisée. Dans ce cas diverses hypothèses doivent alors être prises :

- Un taux d'actualisation de référence de 10% au lieu de 8% pour l'éolien en terre pour tenir compte de la « prime de risque » plus importante pour les investisseurs privés.
- o Une décroissance du coût d'investissement au kW de 2% jusqu'en 2010 à partir de la valeur de référence de 1675 €/kW <sup>9</sup> et de 1,5% par an de 2011 à 2030. Avec ces hypothèses, les coûts d'investissement sont de 1 517 €/kW en 2007, 1 324 en 2015, 1 229 en 2020 et 1 059 en 2030.

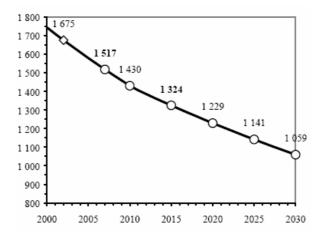


Figure 16 : Evolution du coût d'investissement (Source ADEME, 2002)

- L'éolien offshore serait au bout d'une génération (2030) au même coût d'investissement que l'éolien à terre au début de la décennie 2000. Cette décroissance prend compte du fait que les installations seront progressivement réalisées dans des conditions de plus en plus difficiles: moins de 10 km des côtes et moins de 10 m d'eau d'ici 10 ans, puis jusqu'à 30 km et 30 m de profondeur dans les décennies suivantes.
- o Ratio entre les dépenses annuelles moyennes d'exploitation et de maintenance (y compris provisions pour grosses réparations, pour renouvellement de principaux composants au bout de 15 ans et pour le

<sup>9</sup> Cette valeur de 1675 EUR/kW est celle constatée sur la première installation éolienne en mer à grande échelle, le projet danois de Horns Rev mis en service industriel en fin 2002, de 160 MW et situé en mer du Nord dans des eaux de 6 à 14 m de profondeur

- démantèlement en fin d'exploitation) et l'investissement initial égal à 6 % pour tenir compte des conditions spécifiques de coût d'intervention en mer (au lieu de 4 % à terre).
- O Trois productivités annuelles moyennes de référence exprimées en fonctionnement équivalent annuel à la puissance nominale: 2 600 h/an (vitesse annuelle moyenne de 7.5 m/s au niveau du moyeu), 3 200 h/an (vitesse annuelle moyenne de 8.5 m/s) et 3 800 h/an (vitesse annuelle moyenne de 9.5 m/s).
- O Parcs éoliens en 2007 de plus de 30 MW, constitués typiquement de machines de 80 à 100 m de diamètre (puissance nominale de 2 à 4 MW) sur des mâts émergeant de 60 à 80 m. En 2015, parcs de plus grande puissance (typiquement de 100 à 500 MW) avec des machines de 100 à 120 m de diamètre (de 4 à 6 MW).

Avec ces hypothèses, les résultats obtenus sont repris sur la figure suivante.

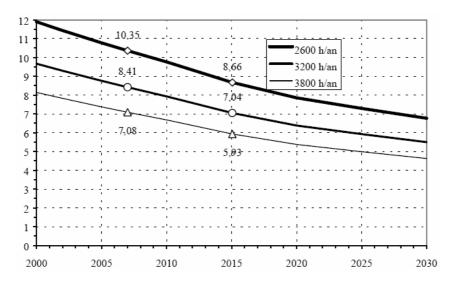


Figure 17 : Evolution du prix de revient (Source ADEME, 2002)

On peut alors en conclure qu'à l'horizon de 2007 (projets décidés typiquement en 2003), le coût de revient de l'éolien en mer varie dans l'hypothèse de référence d'actualisation à 10 % de 7.1 c€/kWh sur un site en mer de très bonne qualité (productivité de 3 800 heures/an et vitesse annuelle moyenne de 9.5 m/s au moyeu) à 8.4 c€/kWh sur un site en mer de qualité moyenne (productivité 3 200 h/an, 8.5 m/s au moyeu) et à 10.4 c€/kWh sur un site en mer de qualité médiocre (productivité 2 600 h/an, 7.5 m/s au moyeu). A l'horizon 2015, les coûts de revient baisseront respectivement à 5.9, 7 et 8.7 c€/kWh pour les productivités de 3 800, 3 200 et 2 600 h/an.

Compte tenu de la sensibilité du coût de revient au taux d'actualisation pris en référence, le choix d'un taux de 8 % au lieu de 10 % serait aussi possible dans le cas de l'éolien en mer pour des investisseurs privés si des conditions de financement privilégiées sont mises en place et si une « mutualisation des risques » et une prise en charge partielle par les pouvoirs publics s'avérait possible. Avec ce taux d'actualisation de 8 % réels, les

coûts de revient seraient alors en 2015 de respectivement 5,4, 6,4 et 7,8 c€/kWh sur les sites de qualité décroissante.

A long terme (≅ 2030), les coûts de revient de l'éolien en mer seraient de l'ordre de 4, 5 et 6 c€/kWh, soit des valeurs qui, compte tenu des faibles externalités de cette filière, la rendraient sans doute complètement rentable par rapport à des filières basées sur les énergies fossiles chargées de leurs externalités (Pour rappel, 3 à 4 c€ par kWh sans tenir compte des coûts externes, presque le double en taux d'actualisation les prenant en compte). Sans oublier que les prix de ces dernières risquent d'augmenter dans le futur avec la raréfaction des ressources.

Dans cette analyse, à tous les horizons temporels de 2007 à 2030 l'éolien en mer produit un kWh plus coûteux que l'éolien à terre sur les sites de qualités respectives équivalentes (très bonne, moyenne et médiocre). Ceci ne condamne bien sûr pas l'usage de l'éolien en mer compte tenu de l'épuisement plus rapide des possibilités de trouver des sites de bonne qualité à terre.

Mais il faut également tenir compte du site d'implantation du parc éolien. En effet, selon le type de sol, l'éloignement à la côte, la puissance d'une éolienne ou du parc entier, le nombre d'éoliennes et surtout la profondeur d'eau du site, les investissements et, de ce fait, les coûts de revient seront différents.

Prenons, pour illustrer ceci, deux sites bien différents. Le premier est un site en mer du Nord et le second en Méditerranée. Les différentes caractéristiques sont reprises dans le tableau suivant. Ce sont des valeurs typiques des zones considérées.

|                          | Mer du Nord                  | Méditerranée  |
|--------------------------|------------------------------|---|
| Puissance totale         | 100 MW                       | 400 MW  |
| Puissance d'une éolienne | 2.5 MW                       | 5 MW  |
| Nombre d'éoliennes       | 40                           | 80  |
| Profondeur d'eau         | 8 m                          | 50 m  |
| Distance à la côte       | 8 km                         | 20 km   |
| Type de sol              | Sable sur argile de Flandres | 20 m de sédiments peu<br>consolidés sur sédiments<br>consolidés |

Tableau 3-1 : Caractéristiques des deux sites choisis (Source : SAIPEM, 2004)

Il faut également tenir compte des conditions extrêmes (marnage, vents, vagues et courants) qui sont différentes dans les deux mers afin de dimensionner le mât de l'éolienne. En tenant compte de toutes ces caractéristiques, deux structures différentes sont choisies.

Une éolienne possédant un rotor de 80 m de diamètre et un monopieu de 4 m de diamètre et de 35 m de longueur enfoncé dans le sable est utilisée en mer du Nord. La masse d'acier utilisée est de 350 tonnes par éolienne ce qui correspond à 140 kilos/kW.

En méditerranée, la plus grande profondeur d'eau oblige à mettre en oeuvre des structures « jacket », constituées de tubes soudés assurant une large emprise sur le fond. Un problème additionnel rencontré sur cette zone provient du sol, qui est une vase présentant une très faible tenue mécanique. Afin d'assurer l'assise de la structure, il est nécessaire de prévoir quatre ancres à succion par éolienne. Chaque ancre a un diamètre de 7,5m une hauteur de 15m et une masse de 134t. La nacelle de l'éolienne de 5MW est située à 126 m au dessus du fond. La masse totale d'acier nécessaire pour une unité est de 1566 tonnes ce qui correspond à 313 kilos/kW.

Malgré une puissance nominale doublée en Méditerranée, ces chiffres indiquent clairement que les quantités de matériaux nécessaires augmentent très vite avec la profondeur, et que l'ancrage dans le sol peut mobiliser également beaucoup de matière.

Un autre aspect à ne pas négliger est le câblage électrique qui peut représenter un budget très important surtout si le parc se situe à une grande distance de la côte. Les câbles utilisés sont des câbles sous marins spéciaux. Dans ce cas d'étude, on suppose que les éoliennes sont reliées entre elles par du 36 kV, que l'énergie est ramenée vers une station de transformation située sur une plate-forme en mer et que l'électricité est ensuite transporté à terre par un ou plusieurs câbles haute tension (170 à 225 kV) ensouillés.

En tenant compte de toutes ces caractéristiques, on peut alors déterminer les coûts d'investissement et comparer les différences entre les deux installations. Ces données sont reprises dans le tableau suivant.

|  | Mer du Nord     | Méditerranée    |
|--|-----------------|-----------------|
| Investissement total                     | 2060 €/kW       | 3020 €/kW       |
| Eolienne (mât, rotor et nacelle)         | 48% (990 €/kW)  | 32% (996 €/kW)  |
| Structure support et installation en mer | 34% (700 € /kW) | 58% (1752 €/kW) |
| Electricité (câblage)                    | 18% (370 €/kW)  | 10% (302 €/kW)  |

Tableau 3-2 : Coûts de revient en fonction du site (Source : SAIPEM, 2004)

On remarque que les coûts d'investissement sont plus élevés en Méditerranée et cela est entièrement dû à la plus grande profondeur dans ce parc éolien. Le coût de l'éolienne elle-même est plus ou moins identique, ce qui semble logique. Par contre, le coût du câblage est plus faible en Méditerranée alors que le parc se situe plus loin de la côte. Cela s'explique par le fait que ce parc éolien comprend plus d'éoliennes et présente une puissance totale plus élevée. Le coût par kW en est alors diminué.

Le prix de vente de l'électricité nécessaire pour rendre les projets viables dépend des coûts d'investissement, des dépenses d'exploitation et de maintenance, de la ressource

éolienne locale, de la durée de vie du parc, du taux d'actualisation, du taux de rentabilité désiré pour rémunérer les risques encourus.

Si l'on considère les mêmes hypothèses que précédemment pour le calcul du prix de revient de l'électricité, ce prix est estimé à 12 c€/kWh en Mer du Nord et 13 c€/kWh en Méditerranée pour l'année 2002. Les prix sont un peu plus élevés que dans le calcul précédent car dans ce dernier, le site offrait de meilleures conditions. Par contre, la différence des prix de revient des deux derniers sites est faible par rapport à l'investissement total. Cette faible différence s'explique encore une fois par le fait que le parc situé en Méditerranée comprend plus d'éoliennes et est bien plus puissant.

Nous pouvons conclure en disant que plus un parc est situé dans des conditions difficiles, plus il doit compter un grand nombre d'éoliennes pour être rentable.

### Impacts économiques en tant qu'énergie renouvelable

Si l'on veut être complet dans l'analyse économique, il faut également considérer le bénéfice que génèrent les énergies renouvelables au niveau des gaz à effet de serre. Ceci est valable aussi pour les technologies décrites ci-après. La baisse de ces émissions présente un impact positif dont l'objectif est d'éviter des conséquences jugées catastrophiques à terme. Il est cependant très complexe de déterminer monétairement à combien s'élève ce bénéfice. Les clauses de rachat obligatoire par le réseau électrique (certificats verts en Belgique par exemple) sont une procédure visant justement à valoriser économiquement ces productions d'énergie ainsi que leurs prix de vente.

Les impacts positifs ou négatifs de ce type de production sur l'environnement et ses usages concurrents doivent être évalués. En ce qui concerne la perte de la biomasse, des hypothèses doivent être posées afin de déterminer le manque à gagner. Comme vu précédemment, cette perte n'est généralement pas élevée. La fermeture du site à la pêche permet de créer un effet de réserve, aussi la base des éoliennes assure quant à elle un effet récif. Si l'on considère qu'il peut y avoir un transfert de la biomasse vers une zone où la pêche est autorisée, cet impact est positif. Pour la navigation, la fermeture du site peut provoquer un allongement des routes et de ce fait, une surconsommation. Des accords avec les marins peuvent être trouvés afin d'accorder des compensations. Enfin l'impact sur le tourisme et le loisir est très difficilement chiffrable et ne sera pas discuté dans le cadre de ce travail.

# 3.1.8. Perspectives

Une autre solution pour augmenter la rentabilité d'un parc situé dans des grandes profondeurs est d'utiliser les éoliennes flottantes. Cette technologie, toujours en développement, doit encore atteindre avant d'être exploitée. Différents concepts sont étudiés à l'heure actuelle.

### Flotteur lesté (SPAR)

Le concept correspondant est dénommé « spar » en anglais, ou longeron. Ceci traduit bien l'idée de maintenir une structure relativement fine et allongée debout, en assemblant un flotteur près de la surface de l'eau et un lest en partie basse. Le vent dans le rotor conduit immanquablement à une inclinaison du mât. Si on veut limiter cette inclinaison, on est conduit à des flotteurs de taille rédhibitoire. Par contre, si on accepte de voir le mât se pencher quand il y a du vent, on peut concevoir un ensemble de taille raisonnable.

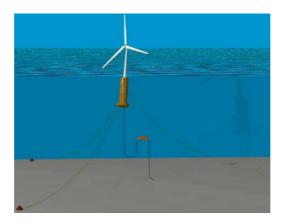


Figure 18 : Eolienne à flotteur lesté (Source : SAIPEM, 2004)

### Plates-formes à lignes tendues (TLP)

La dénomination anglo-saxonne est TLP (tensioned leg platform). Le flotteur est maintenu immergé par des lignes d'ancrage qui sont constamment sous tension. Les lignes d'ancrage sont parallèles entre elles, si bien que le mât de l'éolienne reste vertical lorsque des excursions latérales se produisent. Le couple de renversement est compensé par les différences de traction entre les différentes lignes d'ancrage accrochées sur le flotteur par des bras. Cette solution permet de réduire la taille du flotteur, surtout si l'entraxe des bras est grand.

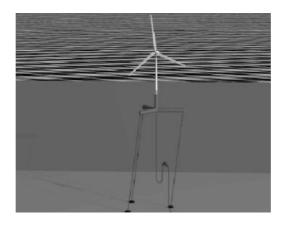


Figure 19 : Eolienne à lignes tendues (Source : SAIPEM, 2004)

#### **Multi-flotteurs**

Pour maintenir l'éolienne verticale, il est possible d'assembler plusieurs flotteurs dans une structure qui présente une assise suffisante. Ce concept a été décliné sous plusieurs formes dans la littérature, soit avec un rotor unique, soit avec plusieurs rotors sur la même structure.



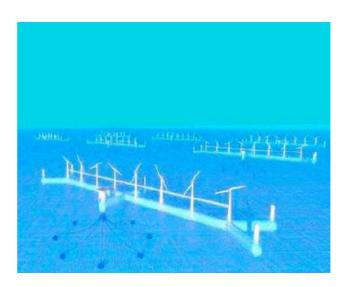


Figure 20 : Eolienne à multi-flotteurs (Source : SAIPEM, 2004)

Quand ces éoliennes seront au point, une plus grande rentabilité est prévue et les éoliennes seront certainement très concurrentielles avec les filières classiques surtout que le prix de celles-ci ne cessent d'augmenter. Certaines études prévoient 50 GW d'éoliennes offshore installées d'ici 2030. En considérant, une productivité de 3000 heures par an, une génération de 150 TWh, ce qui correspond à 3.3% de la demande européenne en électricité en 2030. Pour ce faire, il faut également une volonté politique en accord avec ce développement. Les décisions prises récemment pour le parc éolien situé en face de Knokke ne permettront assurément pas une extension favorable de cette technologie.

# 3.2. L'énergie marémotrice

# 3.2.1. Définition de l'énergie marémotrice

Les marémotrices sont basées sur le même principe que les centrales hydrauliques classiques. L'énergie hydroélectrique est la production d'énergie utilisable sous forme d'électricité à partir de l'énergie potentielle de l'eau. Cette électricité est produite par un générateur, une fois que l'eau en mouvement est passée à travers une turbine.

Dans sa forme la plus pure, l'énergie hydraulique implique le mouvement de l'eau sous l'influence naturelle de la gravité, fournissant l'énergie nécessaire dans une direction descendante. Cela nécessite souvent une source originelle importante et un réservoir conséquent pour le flux de sortie. Etant donné que les systèmes naturels comme les rivières contiennent déjà une grande partie de ces éléments, elles peuvent être utilisées. Dans le cas où le mouvement naturel de l'eau ne serait pas possible ou insuffisant pour la production d'énergie, il est possible de rencontrer des systèmes comme les barrages où l'eau est dirigée sur une turbine en sous-sol, puis pompée pour être ramenée à sa source après utilisation (en général pendant les heures creuses de consommation d'électricité). Les projets à large échelle de barrages hydroélectriques sont les exemples les plus courants de la production d'énergie hydroélectrique car ils permettent de contrôler l'alimentation en eau en fonction de la demande en énergie. Les projets à plus petite échelle impliquent l'installation d'une petite turbine à eau dans un courant d'eau rapide pour la production d'électricité ou pour des usages traditionnels, comme pour moudre le blé. La production globale d'énergie hydroélectrique peut être importante car les réserves en eau disponibles et utilisables sont largement répandues.

Durant les cent dernières années, le développement de l'énergie hydroélectrique a démontré la maturité de cette technologie, faisant de l'eau la première source d'énergie renouvelable utilisée dans le monde. L'hydroélectricité présente de nombreux avantages comme une haute efficacité de production, un haut rendement de production par comparaison aux autres sources d'énergie.

L'énergie marémotrice dépend des variations journalières de la marée pour produire de l'énergie, comme l'eau avance et recule sur la côte. La marée est le mouvement oscillatoire du niveau de la mer résultant des attractions de la Lune et du Soleil sur les particules liquides. Le phénomène est donc une conséquence de la gravitation universelle. Les marées n'ont pas la même ampleur au cours de l'année. Cette variation s'explique par les différentes positions occupées par la Terre par rapport aux astres (Lune et Soleil) tout au long de l'année.

Les divers bassins océaniques, en raison de leur constitution, ne réagissent pas de la même manière à ces actions. Une côte avec une forte marée peut produire une quantité non négligeable d'énergie en permettant le mouvement naturel de l'eau à travers ses portes. Les centrales énergétiques à marémotrice ont besoin de turbines spéciales tournant dans les deux sens, utilisant les marées montantes et descendantes. Les baies ou les estuaires peuvent

être facilement endommagés d'un point de vue environnemental. Ces points sont expliqués plus en détail dans la suite de ce travail. Il est également nécessaire d'avoir des marées importantes. De ce fait, les sites pouvant accueillir des projets de marémotrice sont peu nombreux. Ils se trouvent principalement en France dans la Baie du Mont Saint Michel (où se trouve l'usine de la Rance) et au Canada dans la Baie de Fundy (où le marnage dépasse 10 mètres, ce qui génère des courants de marée intenses pouvant dépasser 5 nœuds, soit 10 km/h environ).

L'énergie marémotrice n'est exploitable que près des côtes. En effet, en pleine mer les variations de hauteur sont très faibles. Mais cette faible variation provoque, grâce à l'onde de marées des différences de niveaux beaucoup plus importantes le long du littoral, surtout quand celui-ci présente une forme d'entonnoir (baie du Mont St-Michel par exemple). En effet, l'onde est alors répercutée et les marées s'en trouvent amplifiées.

L'énergie potentielle d'un bassin est déterminée de la façon suivante. Soit A l'amplitude de la marée, différence de niveau entre les marées haute et basse, et V le volume que le bassin peut emmagasiner entre ces deux niveaux. Afin de simplifier, le rendement des turbomachines est considéré comme parfait et les débits utilisables sont illimités. Sous une hauteur de chute h, le débit q produit une puissance P selon la formule suivante :

$$P = qh$$

La surface du bassin varie selon la hauteur z de la marée. On la note S(z). L'énergie produite en vidant une tranche dz est S(z)dz. Au vidage, l'énergie produite par cycle est :

$$\int_{0}^{A} S(z)zdz$$

et au remplissage:

$$\int_{0}^{A} S(z)(A-z)dz$$

en supposant que vidage et remplissage puissent se faire par tranches horizontales pendant un étale, le niveau de la mer étant à la cote zéro ou A. L'énergie totale par cycle en double effet est, avec les hypothèses simplificatrices :

$$A\int_{0}^{A}S(z)dz=AV$$

soit le produit de l'amplitude par le volume utilisé, formule valable pour une forme quelconque de bassin.

Chaque mètre cube d'eau entrant dans le bassin est ainsi utilisé sous la hauteur A. Si toutes les marées étaient d'amplitude A, à la fin de l'année les 705 marées donnent pour chaque mètre cube d'eau de la retenue une hauteur de chute cumulée de 705\*A. En fait, A varie tout au long de l'année ainsi que V, qui en dépend directement, le bassin, sauf pour les

marées de vive-eau extrêmes, ne se remplissant pas complètement et ne se vidant pas jusqu'au fond.

### 3.2.2. L'usine marémotrice de la Rance

La plus grande réalisation de ce genre est l'usine de la Rance (240MW). Le site de l'estuaire de la Rance a été choisi car l'amplitude du marnage est très importante. Il atteint en effet 13.5 mètres lors des marées d'équinoxe. Cet atout provient de la presqu'île du Cotentin qui représente un obstacle pour l'onde de marée qui remonte vers la Manche.

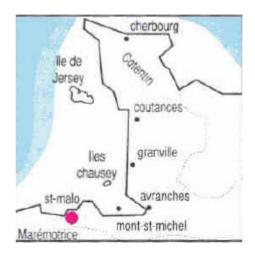


Figure 21 : Site de la Rance (Source : IVL, 1999)

L'estuaire représente un bassin indispensable pour le bon fonctionnement de la marémotrice. Ce bassin est délimité par le barrage de l'usine. Il atteint une surface de 22 km² et un volume de 184 millions de m³. La stabilité des sols (roches granitiques) est également un atout du site qui permet à l'usine de rester en équilibre.

Deux problèmes majeurs se présentaient lors de la conception de l'usine. Le premier provient de la corrosion marine. La corrosion est le phénomène de dégradation d'un substrat métallique par le milieu dans lequel il se trouve placé. Elle est due à la tendance des métaux à retourner à l'état stable des minéraux naturels : oxydes, sulfates, carbonates, etc. En présence de chlorures, d'humidité et d'oxygène, la corrosion progresse assez rapidement. Les produits de corrosion, qui occupent deux fois le volume de l'acier original, exercent des contraintes de traction dans le béton environnant. Lorsque ces contraintes internes sont excessives, le bé ton à proximité des armatures se fissure, puis tôt ou tard éclate et s'effrite. Il faut alors le réparer sans tarder avant que les armatures ne subissent des dommages irréparables. Cette corrosion peut être rendue impossible par la mise en œuvre d'une protection cathodique de l'ouvrage à protéger. La protection cathodique d'un ouvrage métallique en contact avec un électrolyte consiste à placer cet ouvrage à un potentiel électrique négatif tel que la corrosion devienne thermodynamiquement impossible. Concrètement, le métal à protéger est couplé à une anode inerte. On impose alors à l'équipement à protéger son potentiel à l'aide d'un générateur de courant.

Le second problème résultait d'un encombrement trop important des turbines ou bulbes. Ces dernières ont normalement un axe vertical ce qui aurait engendrer une usine de taille beaucoup plus élevée et beaucoup plus difficile à intégrer dans l'estuaire. Pour ce faire, des bulbes à axes horizontaux ont été créés. Ces engins ont permis une intégration plus importante dans le site et surtout la construction du pont au-dessus de ces bulbes, permettant une plus grande acception par les concitoyens. Il s'agit d'une première innovation sur les turbines. D'autres sont abordées par après.

L'ensemble des ouvrages comprend de la rive gauche à la rive droite : Une écluse rétablissant la navigation entre le bassin et la mer, l'usine proprement dite située dans la partie la plus profonde de la Rance qui abrite 24 groupes du type 'bulbe', une digue en enrochement dite « digue morte» complétant la fermeture de l'estuaire entre l'usine et l'îlot de Chalibert et un barrage mobile équipé de 6 vannes qui relie l'îlot de Chalibert à la culée rive droite. Le couronnement des ouvrages supporte une route à grande circulation reliant Dinard à St-Malo. Constituée par deux chaussées de 7 m de large avec un terre-plein central, elle franchit l'écluse à l'aide de deux ponts levants de 9 m de largeur chacun.



Figure 22 : Marémotrice de la Rance (Source : EDF, 1996)

Les anciens moulins à marées n'étaient actionnés que lorsque la mer se retirait, c'est à dire deux fois par jour. En revanche, par souci de rentabilité, l'usine marémotrice de la Rance est capable de turbiner aussi bien au moment du remplissage du bassin qu'à celui du vidage, à marée montante comme à marée descendante. Pour cela, le nouveau type de turbines, les groupes bulbes, sont capables de fonctionner dans les deux sens. Ces groupes en forme de bulbe rassemblent dans une même coque métallique immergée dans un conduit hydraulique une turbine reliée par son axe à un alternateur.

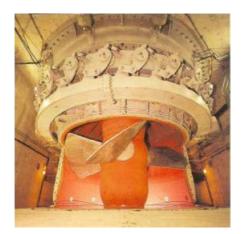
Les pales des turbines peuvent changer d'orientation suivant le sens du courant. Chaque bulbe possède un diamètre de 5.3 mètres de diamètre, et un poids de 470 tonnes pour une puissance unitaire de 10 MW.

L'exploitation de la marémotrice peut s'effectuer de deux manières, soit par la méthode du simple effet, soit par la méthode du double effet.

Pour le simple effet, lorsque la marée a atteint son plus haut niveau, les vannes sont fermées. On attend ensuite que la mer ait suffisamment baissé de façon à avoir une certaine hauteur de chute entre le niveau du bassin et le niveau de la mer. La chute d'eau permettra

de faire tourner une turbine entraînant un alternateur. Dans ce cas, la production d'électricité sera donc intermittente et suivra le rythme des marées et non le rythme des activités humaines. Sur les berges de l'estuaire de La Rance, on peut encore voir les vestiges d'anciens moulins à marées qui fonctionnaient selon ce principe.

Cependant, on peut allonger le temps de marche de l'usine marémotrice en ajoutant un deuxième effet qui permet de produire de l'énergie lors de la phase de remplissage du bassin. Cela suppose de fermer les vannes à la basse mer de façon à isoler le bassin alors presque vide, puis de les ouvrir lorsque la marée est haute. Le double effet implique d'avoir des turbines et des alternateurs capables de fonctionner en tournant dans les deux sens comme expliqué ci. Ce qui caractérise l'usine marémotrice de la Rance, c'est surtout ses cycles d'exploitation déterminés avant tout par les marées mais également par la disponibilité prévisionnelle des groupes et des vannes et la prévision hebdomadaire de la valeur de l'énergie. Les groupes bulbes qui équipent la Rance ont été spécialement conçus pour fonctionner de cette manière.



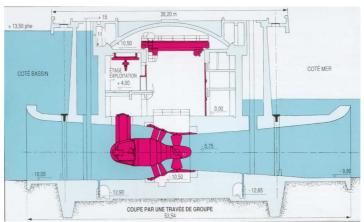


Figure 23 : Turbines ou bulbes (Source : IVL, 1999)

Afin d'augmenter le temps d'exploitation de l'usine, les groupes bulbes ont été conçus de manière à pouvoir être utilisés comme pompes ce qui leur confèrent une troisième caractéristique innovante après le fonctionnement horizontal et en double sens. Ainsi, lorsque la mer est proche du niveau de haute marée, le remplissage du bassin est accéléré par pompage. Ce supplément permet d'augmenter le volume d'eau du bassin et ainsi, lors du flux suivant, les turbines seront actionnées plus tôt et plus longtemps. Ce système de pompage-turbinage permet d'amplifier ou d'anticiper la production en fonction des besoins en électricité du réseau.

L'usine, d'une puissance totale de 240 W (24 bulbes de 10 MW) permet de produire 608.5 millions de kWh par an. De ce total doit être déduit l'énergie de pompage qui s'élève à 64.5 millions de kWh, ce qui donne au total une production nette annuelle de 544 millions de kWh ou 544 GWh.

Si l'on observe le bilan énergétique, on peut considérer qu'après 35 ans de production sans accident majeur, la technologie de ces centrales est au point. La nature périodique (12h) de la ressource fait que les centrales ne produisent pas en continu, mais

seulement quatre à cinq heures par cycle, et donc pas nécessairement en phase avec la demande. Par contre, cette énergie est totalement prédictible. La réversibilité des groupes bulbes a permis d'optimiser la production de l'usine de la Rance, notamment pour pomper de l'eau lors des heures creuses et stocker ainsi de l'énergie.

### 3.2.3. Potentiel

L'ordre de grandeur de l'énergie naturellement dissipée annuellement par les marées est évalué à 22 000 TWh soit l'équivalent de la combustion d'un peu moins de 2 Gtep. Seule une fraction de cette énergie étant récupérable, l'énergie marémotrice ne pourra contribuer pour l'avenir que pour une faible part à la satisfaction des besoins mondiaux. Selon une étude réalisée (Survey Energy Resources, World Energy, 2001), le potentiel de production des sites mondiaux répertoriés susceptibles d'aménagements de ce type est de 400 TWh par an avec un parc mondial de 150 GW installés et une disponibilité de 2 300 heures par an. Ce nombre chute à 15 GW si l'on tient compte de la faisabilité économique du site et donc une production de 40 TWh est possible, soit 1.3% de la production de la consommation actuelle.

Le développement de cette forme d'énergie nécessite de réunir un certain nombre de conditions minimales (amplitudes de marées, géomorphologie spécifique et disponibilité des terrains) avec, comme on le verra par après, un impact environnemental et social important qui fait que les projets d'envergure ont été abandonnés presque partout dans le monde.

# 3.2.4. Impacts environnementaux

Le bassin de la Rance, sur les côtes bretonnes, constitue actuellement le site le plus important (91% de la production) où peut être évalué à long terme l'impact écologique d'un aménagement marémoteur. De ce point de vue, il peut servir de référence pour l'évaluation des impacts environnementaux et il en sera de même pour les autres impacts étudiés par après. C'est donc les résultats obtenus pour l'usine marémotrice de la Rance qui sont décrits ci-dessous.

Pour déterminer les effets sur l'environnement, il convient de distinguer les conséquences de la construction de l'ouvrage et celles dues au fonctionnement de l'usine.

Durant la construction de l'ouvrage, hormis les vidanges sanitaires, l'estuaire fut isolé de la mer ouverte pendant trois années (1963-1966). A l'intérieur du bassin, cette période se caractérise par la suppression des marées, des fluctuations importantes de la salinité des eaux et une forte sédimentation accompagnée d'un accroissement du taux de matière organique. Ces nouvelles conditions ont entraîné la disparition quasi-totale de la flore et de la faune marines. Après la construction, l'estuaire n'était plus qu'un lac d'eau douce, la flore et la faune ont été nécessairement modifiées. Après la construction du barrage, il a fallu attendre dix ans avant que l'estuaire ne redevienne marin et que les bancs de poissons ne retrouvent le chemin de l'estuaire.

Les contraintes d'exploitation de l'usine impriment actuellement aux eaux du bassin une marée dont le rythme est modifié et l'amplitude réduite. Après la construction de l'ouvrage, le niveau moyen des eaux dans la retenue est remonté d'environ 1,5 m. La limite entre les secteurs marins et estuarien a, pour sa part, progressivement reculé. La redistribution des sédiments liée aux violents courants de vidange et de turbinage ou aux durées d'étales prolongées n'est toutefois pas sans importance sur la répartition des espèces.

Sur le plan floro-faunistique, le bassin de la Rance est actuellement toujours riche et diversifié, mais il s'agit d'une diversité différente. Après la phase d'isolement de l'estuaire, les larves et les organismes entraînés passivement par le courant ou nageant activement ont regagné le bassin depuis la mer ouverte. Cette recolonisation fut très progressive et 10 années ont été nécessaires à l'établissement d'un état d'équilibre, différent de l'état initial, qui évolue désormais par le jeu naturel des interactions biologiques, sans relation avec la perturbation initiale. Au début des années 1980, on comptait ainsi 110 espèces de vers marins, 47 espèces de crustacés (contre 44 avant implantation du barrage) ou encore 70 espèces de poissons. La répartition des espèces, entre l'écluse du Châtelier en amont et le barrage en aval, est régie par les nouvelles conditions hydrologiques totalement imposées par l'homme, leur étagement vertical dans la zone artificiellement exondable se réalisant par rapport au niveau moyen bas du bassin. La pérennité du nouveau schéma de distribution des organismes est conditionnée par la stabilité des paramètres écologiques et la régularité du rythme de fonctionnement de l'usine marémotrice.

Les vannes et les turbines empêchent une grande quantité d'espèces marines de remonter dans l'estuaire où elles ont en grande partie disparu. Maquereaux, lançons et autres congres sont maintenant rares, il reste cependant des bars et des lieus.

Un autre grand impact environnemental réside dans le fait que l'estuaire de la Rance subit un envasement important depuis la construction du barrage. La présence du bassin de retenue et les marées artificielles favorisent une forte décantation qui va parfois jusqu'à un phénomène de poldérisation (transformation d'une région en terre gagnée sur la mer endiguée et mise en valeur). Les plages de part et d'autre du barrage le prouvent : à 300 mètres en amont, les plages sont recouvertes d'une accumulation de 70 centimètres de vase, alors que 100 mètres en aval, les plages sont intégralement sableuses.

Pour les points cités jusqu'ici, l'impact humain sur l'environnement est très important et peut être jugé comme très négatif.

Cependant, les travaux conduits en Rance ont révélé que la croissance et la densité de certaines espèces ne sont pas différentes de celles du littoral. Par exemple, le barrage ne semble pas entraver le déroulement du cycle biologique de certaines espèces notamment de la seiche, migrateur nageur. Effectivement, les fortes quantités capturées à partir du printemps suffisent à confirmer la perméabilité satisfaisante de l'ouvrage aux céphalopodes de grande taille. Et les arrivées régulières d'araignées de mer montrent que le barrage ne constitue pas un obstacle majeur pour les espèces marcheuses au comportement migratoire. La richesse du peuplement piscicole de la Rance est élevée et supérieure à celle des autres estuaires et baies dont celle du Mont Saint Michel. La ria abrite des espèces herbivores, planctophages mais aussi des prédateurs de haut niveau comme le bar ou le lieu jaune. Cette bonne santé actuelle du bassin est principalement due à une gestion très importante

soutenue par EDF. Cet exemple prouve qu'il est indispensable dans tout projet de ce genre d'établir un suivi environnemental afin de rétablir une bonne diversité après la destruction due à la construction.

La production de plancton végétal indispensable aux mollusques filtreurs (huîtres, moules ...) du secteur maritime de la Rance est deux à quatre fois plus forte que celle observée sur le littoral breton aux environs de Roscoff. Les mouvements d'eau sont probablement responsables du maintien à un niveau élevé de la productivité du bassin. De même, la production d'invertébrés sur les vasières, qu'elles soient exondables ou non, est forte et permet l'alimentation tant des poissons de fond que des oiseaux limicoles. De ce dernier point de vue, le nombre d'anatidés et de bernaches cravant fréquentant l'estuaire depuis les années 1970 reste très important.

Les conclusions sont les suivantes : après la construction de l'ouvrage marémoteur, étape extrêmement dommageable pour l'environnement aquatique, une faune marine nouvelle s'est progressivement installée et diversifiée dans le bassin de la Rance. L'établissement d'un nouvel équilibre a nécessité 10 à 15 années au-delà desquelles l'écosystème semble fonctionner par le jeu des relations entre espèces, indépendamment de la perturbation initiale. Les fortes productivités, la structure complexe du réseau trophique et la libre circulation au travers des vannes et des turbines d'organismes migrateurs ou erratiques (sans mortalité excessive) témoignent de relations fonctionnelles normales au sein de l'écosystème du bassin et entre celui-ci et les eaux côtières. Cet équilibre biologique repose sur la régularité du fonctionnement de l'usine. Des variations brusques des facteurs environnementaux peuvent avoir des répercussions biologiques drastiques. Le succès d'un aménagement marémoteur repose sur l'adéquation, possible à définir, entre les contraintes d'exploitation et le respect des équilibres biologiques. Au final, même si un nouvel équilibre aussi diversifié que le précédent s'est créé, l'impact est très important d'un côté par la destruction quasi-totale de la faune et la flore lors de la construction de l'usine et d'un autre côté par la création de ce nouvel équilibre ce qui suppose la disparition dans le site de certaines espèces.

# 3.2.5. Impacts sociaux – Impacts sur les activités humaines

La construction du barrage a énormément perturbé les habitants riverains et notamment les pêcheurs. Il n'existe plus au sein de l'estuaire de marées naturelles. La Rance est balayée de flux et de reflux artificiels, créés suivant les besoins de l'usine. Il arrive que la mer monte en trois heures seulement. Le barrage exerce un diktat sur la nature selon les pêcheurs. Ainsi, les habitudes anciennes des pêcheurs qui travaillaient avec l'heure de la mer ont été perturbées. En effet, la planification de leurs travaux ne peut se faire que 48 heures à l'avance grâce aux diffusions, par la presse locale, du niveau dans le bassin et des horaires correspondants. Ainsi, il est difficile pour les marins de s'adapter aux contraintes de circulation imposées par l'ouverture et la fermeture de l'écluse et les possibilités offertes par le niveau d'eau dans le bassin. Le barrage a rompu le lien entre estuaire et bord de mer. Autrefois, les marins venaient confectionner leur équipage dans l'estuaire, ce qui est plus difficilement réalisable à l'heure actuelle. Le barrage est peu aimé dans la région. Les marins

qualifient leur estuaire de « grand lac salé ». De plus, la pisciculture ne peut plus être exercée librement car les panneaux risquent d'entraver la libre circulation de l'eau.

Cependant le bassin de la Rance offre des conditions particulières agréables. Les eaux sont abritées, relativement profondes, souvent renouvelées et bien oxygénées ce qui permet une bonne production des salmonidés par la technique des cages flottantes. Le bassin, lui est un lieu de plaisance favorable au tourisme. Il procure à tous une vaste étendue de 2200 hectares à marée haute. De plus, les courants extrêmement rapides d'antan ont diminué avec la construction du barrage. Ces deux conditions permettent aux plaisanciers de développer pleinement leur activité, l'estuaire abrité est propice à une navigation sûre et calme. Ce bassin conduit à un accroissement annuel de 15% de la flotte de plaisance régionale. Le trafic à l'écluse peut témoigner de l'attrait de la Rance sur la plaisance : il a plus que triplé entre 1960 et 1980. Cependant, l'explosion de la plaisance conduit peu à peu à des encombrements navals à l'écluse surtout au mois d'août avec plus de 8000 passages (1800 en temps normal), et cela malgré les dimensions impressionnantes de l'écluse permettant de livrer passage à un sous-marin.

Au niveau des emplois, ces activités font travailler 61 personnes réparties dans huit entreprises. L'usine marémotrice est également elle-même un lieu de tourisme avec plus de 400 000 visiteurs chaque année.

### 3.2.6. Impacts économiques

Le coût de revient de l'électricité produite par l'usine marémotrice de la Rance est très compétitif. Il est de l'ordre de 3.5 c€ par kWh produit. Ce prix est semblable à celui de l'électricité produite par le nucléaire.

Autre point positif, la construction d'une route sur le barrage a permis de créer un axe de communication entre deux rives. Il s'agit là d'un facteur d'union entre les deux rives même si le passage de l'écluse est une véritable contrainte pour tous les riverains de l'estuaire. La route au-dessus du barrage répond à un besoin exprimé de longue date par les riverains. Elle ramène de 45 à 15 kilomètres la distance entre les villes de Dinard et Saint-Malo. Autrefois, les seuls moyens de communication étaient le pont Saint-Hubert, à 20 km en amont, ou les deux compagnies de vedettes (qui existent toujours). Aujourd'hui, le pont subit une circulation de 25 à 35 000 véhicules par jour. Le barrage contribue à l'équilibre économique des deux rives en favorisant le passage des engins agricoles, le transit des marchandises (la collecte du lait, les produits manufacturés). De plus, cette voie rapproche de leur emploi de nombreuses personnes vivant sur la rive opposée.

De plus, l'usine marémotrice de La Rance a choisi de s'impliquer au niveau régional dans une politique de partenariat. 30 % des prestations extérieures nécessaires à l'exploitation et à la maintenance de l'usine, sont ainsi assurées par des fournisseurs régionaux. L'usine marémotrice de La Rance est également une source de revenus pour les collectivités locales. Ainsi, près de 2.7 M€ par an sont versés en taxes foncières et professionnelles, principalement aux deux communes riveraines (Saint-Malo et La Richardais) ainsi qu'au département et à la région.

### 3.2.7. Perspectives

L'énergie marémotrice a déjà fait ses preuves, principalement dans l'estuaire de la Rance. Les résultats obtenus sont très encourageants avec notamment un coût de revient de l'électricité très compétitif par rapport aux filières classiques. L'impact environnemental est mitigé. Effectivement, même si actuellement la situation semble bonne, elle fut par contre désastreuse la décennie qui suivit la construction de la centrale. L'augmentation importante de l'envasement est aussi un impact négatif. Au niveau humain, le bilan est également mitigé car l'estuaire a été totalement modifié pour les pêcheurs mais la centrale a créé un pôle touristique et un lieu de détente attirant un grand nombre de touristes. Mais la plus grande difficulté pour cette technologie est de trouver des sites appropriés à l'exploitation à ce type d'énergie. C'est pourquoi, à l'heure actuelle, seule une entreprise étudie des projets marémoteurs. Il s'agit de l'entreprise américano-britannique Tidal Electric Ltd, qui propose l'installation de « lagons artificiels», tel le projet de Swansea Bay au Pays de Galles



Figure 24 : Projet « lagon artificiel » au Pays de Galles (Source : ECRIN, 2004)

Le Canada et la Grande Bretagne ont le potentiel d'utiliser extensivement l'énergie marémotrice. La Baie de Fundy étant un site possible pour le premier pays cité et les estuaires de Severn et de Mersey pour le second. Mais à l'heure actuelle aucun nouveau projet n'est en cours de réalisation en Europe, ni même au Canada.

Une autre ressource, qui est en partie causée par les marées, semble beaucoup plus prometteuse pour le futur. Il s'agit de l'exploitation des courants marins.

# 3.3. L'énergie des courants marins

# 3.3.1. Définition de l'énergie des courants marins

On distingue deux types de courants, les courants de surface et les courants de profondeur. La Terre reçoit de façon inégale l'énergie solaire. Elle n'est pas la même selon que l'on se trouve au pôle (car les rayons arrivent de manière très inclinée) ou à l'équateur. La zone intertropicale reçoit ainsi autant d'énergie que le reste de la planète. Ce déséquilibre met en mouvement l'atmosphère et les océans qui vont rééquilibrer thermiquement l'ensemble. Il génère aussi des vents qui sont les facteurs principaux des courants de surface. Ces mouvements sont influencés par une force créée par la rotation de la Terre, appelée force de Coriolis. Les vents n'ayant plus d'influence après 800m de profondeur, ils ne peuvent être les moteurs des circulations océaniques profondes. Ce déséquilibre entraîne également des différences de température suivant la latitude. Cette différence de température entraîne une différence de salinité de l'eau et donc de densité, créant ainsi les courants de profondeur. Les plus profonds portent le nom de courant thermohalin et ceux qui vont un peu moins en profondeur portent le nom de circulation thermocline. Les eaux chaudes de surface se chargent en sel, à cause de l'évaporation ce qui tend à les rendre plus denses. En hiver, lors de la formation de la banquise, la glace une fois formée expulse le sel qui alourdit encore davantage l'eau non gelée qui devient « tellement » dense qu'elle plonge vers les profondeurs.

Point important, les courants de surfaces et les courants profonds ainsi formés se trouvent interconnectés. On a alors introduit l'expression imagée de « tapis roulant » pour décrire le transport d'eau profonde de l'Atlantique vers le Pacifique et son retour en surface. Grâce à la capacité thermique de l'eau, l'océan est un énorme réservoir de chaleur. Son inertie thermique étant beaucoup plus importante de celle de l'air, il tempère les changements thermiques saisonniers des masses d'air, qui autrement seraient beaucoup plus importants. Ainsi les courants chauds des couches de surface peuvent réchauffer le climat d'une région. À l'inverse, les eaux froides qui remontent en surface modèrent la température des eaux des régions équatoriales. Cependant cette circulation reste mal connue car difficile à mesurer directement. L'océan joue ainsi un rôle essentiel pour la régulation du climat de notre planète et il assure un transport de chaleur de l'équateur vers les pôles aussi important que l'atmosphère.

L'énergie hydrolienne correspond à l'exploitation de l'énergie cinétique des masses d'eau mises en mouvement par les courants marins.

Le long des côtes européennes, les courants sont surtout développés par les phénomènes de marée qui représentent une ressource considérable, en particulier dans la Manche. Certaines zones privilégiées par la configuration de côtes profitent d'une onde de marée amplifiée. Ce sont surtout les zones de la Normandie, de la Bretagne et le contour du Royaume Uni qui profitent de courants assez rapides, comme l'indique la carte suivante.

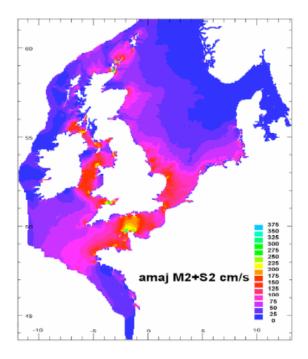


Figure 25 : Evaluation de la ressource en courant marin (Source ECRIN, 2004)

La vitesse et les horaires des courants dépendent du cycle lunaire, mais sont prédictibles longtemps à l'avance. De plus, le décalage de l'onde de marée durant sa propagation dans la Manche permet théoriquement d'obtenir une puissance garantie quasiment continue en équipant au moins partiellement différents sites.

L'énergie des courants marins est récupérée par une hydrolienne. Une hydrolienne peut être assimilée à une éolienne sous-marine. La puissance fournie par un courant traversant une surface de 1m² de surface de rotor est exprimée par la formule :

$$P = \frac{1}{2} \eta \rho v^3$$

Avec  $\eta$  qui représente le rendement de l'hydrolienne,  $\rho$  la densité volumique de l'eau de mer (1024 kg/m³) et v la vitesse du courant. Comme pour l'énergie éolienne, on remarque que la puissance augmente très vite avec la vitesse ce qui prouve qu'il est intéressant d'équiper les sites privilégiés par des courants forts.

La puissance de la ressource augmente très vite avec la vitesse du courant, et on considère que les hydroliennes deviennent intéressantes si le courant dépasse 2 m/s. Dans un chenal de 50 m de profondeur où le courant atteint 3 m/s, l'énergie cinétique de l'eau est de 530 MW par kilomètre de largeur de ce chenal, ce qui est considérable. Ce calcul tient compte du fait que la vitesse de l'eau varie avec la distance sous la surface. Une hypothèse fréquente est que la vitesse varie selon la formule :

$$v = \frac{1}{7}v_0 \frac{z}{p}$$

Avec z la distance au dessus du fond, p la profondeur, vo la vitesse du courant en surface. En fait, la vitesse maximale est généralement située légèrement sous la surface libre.



Figure 26 : Premier prototype d'hydrolienne en Norvège (Source : Marineturbine, 2004)

Les hydroliennes sont prévues pour fonctionner en milieu sous-marin. Elles doivent être très robustes et ne nécessiter que le minimum d'entretien. Les courants rapides n'existent que dans les faibles profondeurs et à proximité des côtes. De ce fait, les machines sont de taille modeste (10 à 20 m de diamètre) et doivent prendre en compte la variation de niveau de l'eau due aux marées. L'installation et la maintenance se font avec des moyens maritimes légers. Les impacts visuels et environnementaux sont limités et doivent être précisés par des expérimentations en mer accompagnées d'un suivi des impacts. Les premiers prototypes sont opérationnels en Norvège et au Royaume-Uni.

Pour déterminer la taille et la puissance nominale d'une hydrolienne, il faut tenir compte de la ressource disponible sur le site et plus particulièrement des marées. Et ceci est également valable pour tout convertisseur d'énergie dépendant d'une ressource fluctuante (Eolien par exemple). Ce sont principalement les marées qui influencent les courants exploitables. L'amplitude des marées varie au fil des jours selon les positions respectives du Soleil et de la Lune. On caractérise la force d'une marée par son coefficient. La figure suivante illustre cette variation.

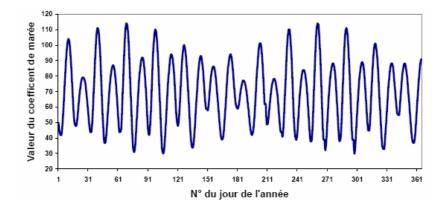


Figure 27 : Variation du coefficient de marée (Source : HydroHelix, 2004)

A proximité des côtes, on peut considérer en première approximation que l'intensité maximale atteinte par le courant lors d'une marée est proportionnelle au coefficient de cette marée. Souvent, la vitesse du flot est différente de celle du jusant, mais les vitesses restent grossièrement proportionnelles à l'amplitude. En général, le flot a une intensité plus forte avec une croissance et une décroissance rapide, alors que le jusant est plus faible en amplitude avec un régime plus stable dans le temps. On constate qu'une hydrolienne installée sur un site donné est soumise à des courants très variables et que la puissance disponible change beaucoup d'une marée à l'autre. La connaissance de cette variation permet de tracer la courbe de puissance cumulée.

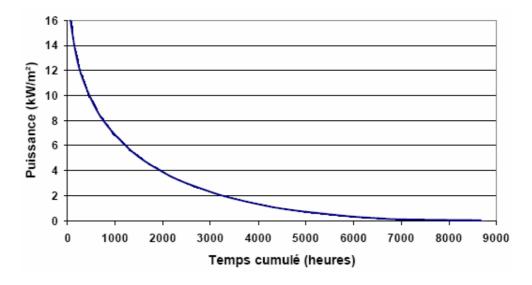


Figure 28 : Courbe de puissance cumulée (Source : HydroHelix, 2004)

On constate que la puissance de 5 kW/m² est obtenue 1560 h par an, et 10 kW/m² 440 h par an. Il convient alors de se poser la question du choix de la puissance électrique nominale de la machine. En effet, si on dimensionne la génératrice pour la puissance maximale des grandes marées exceptionnelles, la ressource sera exploitée au mieux, mais l'investissement consenti sera mal utilisé. Il existe un optimum économique qui doit être recherché en fonction des diverses caractéristiques propres au projet envisagé. Cette procédure de dimensionnement est typique pour les énergies à ressources variables (éolien, hydraulique,...)

### 3.3.2. Potentiel

Le potentiel européen de l'énergie hydrolienne est estimé à environ 12.5GW qui pourraient produire 48TWh annuels (Seatechweek, Brest, 2004), ce qui représente la capacité de trois centrales électriques récentes. Les courants marins pourraient être exploitables partout dans le monde. Les courants de marée constituent toutefois pour l'instant le domaine préférentiel de ce type de technologie : les courants de marée présentent en effet, par rapport aux courants généraux (comme le Gulf Stream), des caractéristiques particulièrement favorables. Ils ont une intensité importante (dans certaines zones, les courants de marée peuvent atteindre ou dépasser 10 nœuds, soit 5 m/s, alors que

les courants généraux dépassent rarement 2 nœuds), ils sont proches de la côte, ils ont une direction stable et enfin ils sont prédictibles.

La France est en phase de développement dans ce domaine. Son potentiel exploitable est identifié à un peu plus de 6 GW réparti en trois sites : La chaussé de Sein (1 GW), Ouessant (2 GW), et le Raz Blanchard (3 GW). Ces trois sites se situent en Bretagne et dans le Cotentin.

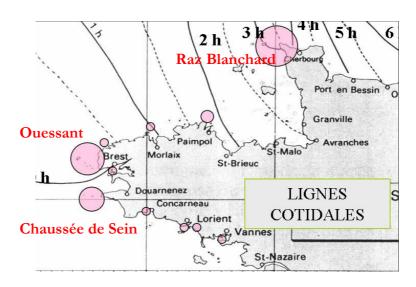


Figure 29 : Sites exploitables en France (Source : HydroHelix, 2005)

Le décalage dans le temps lié à la propagation de l'onde de marée le long des côtes et le foisonnement de la production, à partir de ces 3 sites, garantiront 3 GW en électricité de base, permettant une production annuelle de 25 TWh (soit environ 5% de la production électrique française actuelle).

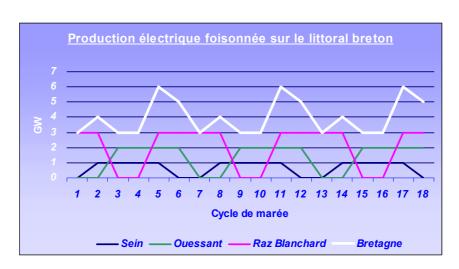


Figure 30 : Production électrique foisonnée sur le littoral breton (Source : HydroHelix, 2005)

# 3.3.3. Impacts environnementaux

Il est indispensable de se poser la question de l'effet potentiel de l'installation d'hydroliennes sur le régime des masses d'eau. Le problème dans sa généralité est compliqué, mais différents modèles numériques permettent de déterminer les ordres de grandeur des interactions éventuelles.

On considère dans le modèle que le chenal est entièrement barré par un mur d'hydroliennes perpendiculaire à la direction du courant. Les hydroliennes peuvent être disposées en rangées sans pour autant constituer un « barrage ». Ceci est en particulier le cas si un espace libre existe entre 2 hydroliennes voisines dans une rangée.

Les résultats indiquent qu'un tel mur d'hydroliennes peut avoir un effet considérable si sa hauteur équivalente est une fraction importante de la profondeur. Le flux d'eau est séparé en 2 parties : l'eau contenue dans le sillage des rotors, fortement ralentie, et l'eau qui n'a pas traversé un rotor, qui est nettement accélérée. Cette accélération se traduit par un remous en surface qui absorbe une partie de la différence de niveau créée par la marée entre les extrémités du chenal.

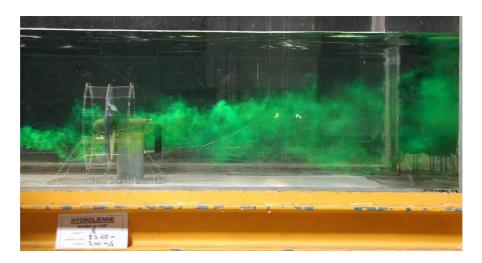


Figure 31 : Remous créés par une hydrolienne (Source : HydroHelix, 2005)

Les résultats de cette première analyse montre que la taille des hydroliennes ainsi que leur nombre dans une rangée ne doit pas être trop grand. D'après certaines études réalisées par HydroHelix, les hydroliennes ne doivent pas obstruer plus d'un dixième de la largeur du chenal.

Une autre raison d'une limitation du nombre d'hydrolienne est que la puissance produite par celles-ci dépend de la vitesse effective du courant. Cette vitesse est influencée par le nombre d'hydroliennes installées. Trop de machines placées l'une à la suite des autres induiraient une perte de vitesse du courant et si celle-ci tombe en dessous de la vitesse nominale, les hydroliennes délivrent moins que leur puissance nominale. On constate qu'il existe une capacité optimale qu'il vaut mieux ne pas dépasser afin que les machines mises en place soient bien utilisées.

L'installation d'hydroliennes dans un chenal doit prendre en considération le respect de la faune et de la flore. Ces zones sont fréquentées par des poissons, dont certains sont migrateurs, et des mammifères marins. Il est essentiel que la dimension et le nombre de machines ne gênent pas le passage. De même, la vitesse du courant exerce une influence sur le développement de la vie aquatique. Le brassage des eaux entre des zones marines différentes exerce certainement un effet sur les mouvements de population, les échanges de nutriments, etc.

Pour toutes ces raisons, dont de nombreuses restent à étudier, il est prudent de considérer à ce stade que le courant qui existe normalement dans le chenal ne doit pas voir sa vitesse trop ralentie (De l'ordre de 10% maximum selon une étude d'HydroHelix).

La réalisation d'un projet pilote permettra de quantifier les impacts réels, de déterminer les limites à ne pas dépasser, ainsi que les remèdes éventuels.

# 3.3.4. Impacts sociaux – Impacts sur les activités humaines

Les enjeux sociaux sont semblables à ceux des éoliennes. En effet, le parc étant fermé à toute autre activité, les principaux enjeux sont les conflits d'usage avec la navigation, les pêcheurs, les zones militaires, les câbles sous marins,... Les conclusions sont donc identiques et elles ne seront pas répétées ici.

Cependant, un certain type d'hydrolienne, développée par la société HydroHelix en Bretagne, offre l'avantage d'être ancrée au sol et de ne pas proposer d'interférences avec la surface. Ce type de machine permettrait une navigation tout à fait libre si elles sont implantées dans des profondeurs assez conséquentes.



Figure 32 : Hydroliennes de la société HydroHelix (Source : HydroHelix, 2005)

Les créations d'emplois ne seront importantes que lorsque ce procédé se développera plus amplement et pourront certainement être comparées à celles de l'éolienne offshore.

### 3.3.5. Impacts économiques

Le premier prototype d'hydrolienne en Norvège a permis d'obtenir les premiers coûts d'investissement. Ils sont élevés à 6300 €/kW. C'est assez élevé car il ne s'agit que d'un prototype mais dès le passage en phase industrielle, le prix chutera à 2350 €/kW. Ce coût d'investissement d'une hydrolienne tendra finalement vers celui de l'éolien, soit 1 € par Watt installé, d'où un investissement de 6 milliards d'€ pour les 3 sites français cités précédemment. Les coûts de maintenance sont estimés à 5% du chiffre d'affaire de la vente de l'électricité.

Le prix de revient de l'électricité revient à plus de 20 c€/kWh pour le prototype norvégien. Dès le passage en phase industriel, ces prix chuteront aux alentours de 8 c€/kWh, ce qui est compétitif.

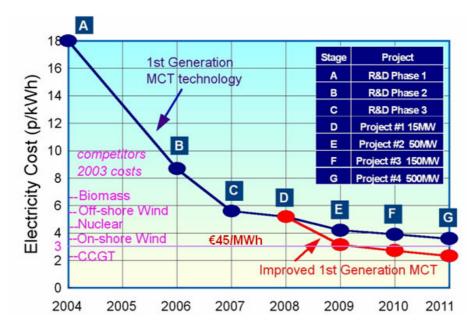


Figure 33 : Prix de revient de l'électricité (Source Marine Current Turbines, 2006)

# 3.3.6. Perspectives

L'exploitation des courants marins semble très prometteuse. En France, HydroHelix projette de construire des hydroliennes d'une puissance de 1,2 mégawatt chacune. Les littoraux breton et normand sont capables de fournir une puissance de 3 gigawatts (GW), soit plus ou moins l'équivalent de trois réacteurs nucléaires. Des pointes à 6 GW seraient possibles pendant les périodes de vives-eaux. D'après Hydrohélix, il faudrait installer 4 500 hydroliennes au fond des mers pour parvenir à un tel niveau de production.

Cela représente un rideau d'hélices de quelque 21 km, disséminé à moins de 6 km des côtes, entre les îles de Sein et Ouessant et face au cap de la Hague, dans le Cotentin.

La consommation instantanée d'électricité française se situant aux alentours de 50 GW, les courants marins pourraient donc fournir entre 6 et 12 % de l'électricité nécessaire à la France. Malheureusement, actuellement, ces nombreux avantages semblent pour l'instant laisser EDF indifférent.

Le Royaume-Uni s'intéresse de près à l'énergie des courants marins. Les premières réalisations sont actuellement en cours. Des initiatives similaires sont en passe de voir le jour en Ecosse et au Pays de Galles, financées par des consortiums associant les industriels et l'Etat.

De nombreux autres projets sont en cours de développement et il faudra certainement attendre les résultats obtenus par différents prototypes pour déterminer celui qui fournira les meilleurs résultats. De part leurs ressources importantes en courant marin, le France et le Royaume Uni étudient de nombreuses solutions. Parmi celles-ci et hormis celles citées précédemment, on trouve le projet Stingray. Ce projet de la société anglaise Engineering Business est basé sur le concept de la nageoire caudale des mammifères marins. Le capteur est une pale symétrique horizontale installée au bout d'un bras qui bat dans le courant, créant un mouvement vertical oscillant. Ce mouvement alternatif entraîne le générateur.

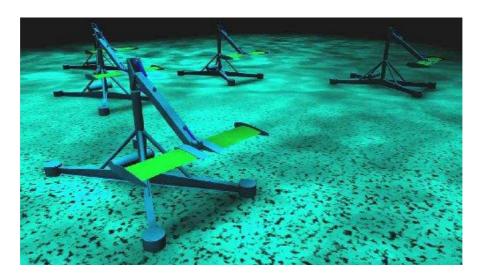


Figure 34 : Projet Stingray basé sur la battement caudal (Source : Sontek, 2005)

Une autre technologie est celle qui utilise le principe du venturi. Un système est placé dans le courant, créant une dépression qui met en circulation, dans un circuit périphérique, un flux d'eau ou d'air qui entraîne la turbine. Ce système est basé sur le tube venturi, qui se resserre comme un entonnoir, dont l'usage principal est les mesures de débit de fluides incompressibles (essentiellement liquides). Ce tube est basé sur le principe de Bernoulli, qui stipule qu'à hauteur constante l'augmentation de débit entraîne une réduction de pression. Cette chute de pression est plus importante au niveau du col du venturi. L'idée principale est d'utiliser cette chute de pression pour aspirer de l'air, comme dans une trompe à eau. Cet air sert à faire tourner une turbine qui produit de l'électricité.



Figure 35 : Projet Venturi (Source : HydroVenturi, 2006)

Une troisième perspective mérite d'être citée, il s'agit des turbines Darius. Le capteur possède un axe de rotation et plusieurs pales symétriques verticaux. Le captage se fait dans un volume (cylindre vertical) et ne nécessite aucun système d'orientation du capteur. Un avantage technologique est que la génération électrique peut être réalisée directement en surface. Le rendement de captage de la puissance hydraulique peut atteindre 41 % pour les grandes unités (cas de l'éolien). Un inconvénient est que le système n'est pas auto-amorçable, il a besoin d'être lancé.

Deux projets revendiquent cette technologie pour la production d'hydroélectricité à partir des courants marins : le projet canadien de la société « Blue Energy » et le projet italien de la société « Ponte Di Archimede ».

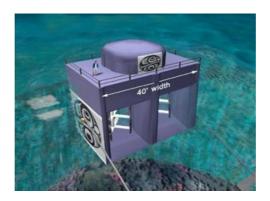


Figure 36: Turbines Darius (Source: Blue Energy, 2005)

Tous ces projets ne sont actuellement que des prototypes voire des idées. Il faudra attendre quelques années afin de se rendre compte si tout ceci est réalisable et surtout rentable.

Cependant le développement actuel des hydroliennes plus classiques est en bonne voie et les premiers résultats prouvent que la filière peut s'avérer très intéressante. Cette technologie présentant de nombreux avantages (bonne prédictibilité, peu d'impacts environnementaux et sociaux), il ne serait pas étonnant qu'elle connaisse une évolution surprenante et, si les investissements suivent, que quelques GW soient installés d'ici une dizaine d'année.

# 3.4. L'énergie des vagues

# 3.4.1. Définition de l'énergie des vagues

L'énergie des vagues est une forme concentrée de l'énergie du vent, elle-même issue de l'énergie solaire, comme le montre le tableau ci-après. L'océan occupant plus des 2/3 de la surface de la Terre, il est évident que le potentiel est immense. Une fois créée, les vagues peuvent se déplacer sur des milliers de kilomètres sans trop de déperdition. L'énergie est ainsi stockée jusqu'à ce qu'elle atteigne les zones peu profondes et les plages, où elle est libérée, parfois avec des effets destructifs. A l'approche des côtes, les frottements avec le fond sont plus élevés et la puissance de la vague diminue. Cependant, par le jeu des réfractions et des réflexions, il peut y avoir une concentration de la puissance dans certaines zones.



Figure 37: Les vagues

La puissance d'une vague est proportionnelle à l'amplitude et à la longueur d'onde de celle-ci. Sur la façade atlantique, la couche des 20 premiers mètres d'eau sous la force est balayée par une énergie, en moyenne annuelle, de l'ordre de 2.5kW/m² de surface verticale perpendiculaire à la propagation de la houle. Cette puissance est généralement chiffrée en kW par mètre de front de vague en se ramenant à la surface

| Solaire | 150W/m  | Surface horizontale au sol                     |
|---------|---------|--|
| Eolien  | 400W/m  | Surface verticale à 50m de hauteur             |
| Houle   | 2500W/m | Surface verticale entre 0 et 20m de profondeur |

Tableau 3-3 : Comparaison des densités de puissance moyennes de diverses énergies renouvelables (Source : ECRIN, 2004)

Les principales difficultés de la récupération de l'énergie houlomotrice sont les variations de l'amplitude, de la période et de la direction des vagues. Il est difficile d'obtenir une efficacité maximum d'un dispositif sur la gamme entière des fréquences d'excitation. Les conditions extrêmes pouvant survenir en mer sont également sources de contraintes énormes pour les installations. Un ouragan par exemple, peut introduire des charges 100 fois plus élevées que dans des conditions moyennes. Une troisième difficulté est de coupler

le mouvement lent et irrégulier de la vague aux générateurs électriques qui nécessitent des fréquences 500 fois plus grandes.

Toutes ces contraintes font que les systèmes convertisseurs d'énergie doivent être fortement sophistiqués pour être efficaces et fiables d'une part et économiquement réalisables de l'autre. Comme pour toutes autres sources d'énergie renouvelable, le potentiel disponible doit être étudié afin de déterminer si le projet est rentable.

Cette technologie est en cours de développement et les premiers essais ont lieu actuellement. Les difficultés de prévoir l'intensité des vagues, de définir la résistance des convertisseurs ainsi que les fausses informations et le manque de compréhension de la technologie par l'industrie, le gouvernement et le public, ont souvent ralenti le développement.

# 3.4.2. Les systèmes de première génération

Afin d'éviter les problèmes cités ci-dessus, les systèmes de premières générations utilisés pour produire de l'énergie à partir des vagues n'ont pas été construit en pleine mer mais bien sur les côtes. Le principe est basé sur le courant d'air poussé à travers une turbine grâce à l'effet oscillant de la colonne d'eau qui monte et descend à chaque vague. Ceci est réalisé par une chambre en béton onshore avec une turbine à l'intérieur du tunnel capable de produire de l'énergie à partir du vent circulant dans tous les sens dans la turbine. Cette technique a été développée par Wavegen avec le « LIMPLET », qui est capable de produire 0,5 MW d'énergie à partir de la force des vagues.

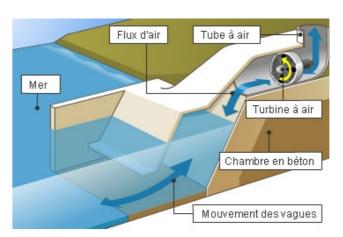


Figure 38 : Systèmes de première génération (Source : Planète Energie, 2003)

Ces systèmes ont un impact majeur sur les côtes de part leurs installations et n'exploitent que l'énergie qui parvient effectivement au littoral, après dissipation sur les hauts fonds. Ils ont de ce fait été assez rapidement oubliés.

# 3.4.3. Les systèmes de seconde génération

Les systèmes de seconde génération sont des installations offshore implantées plus au large, et sont capables de survivre aux plus fortes tempêtes. Ce système est composé de modules flottant sur l'eau ce qui leur permet d'être implanté dans n'importe quelle profondeur d'eau quelle que soit la nature du fond, contrairement à l'éolien offshore.

Le principe est le suivant. Le support flottant est relié par un ancrage tendu au fond marin et comporte des moyens hydrauliques et mécaniques permettant de convertir l'énergie cinétique, engendrée par les déplacements verticaux de ce support relativement au fond marin, en énergie électrique, mécanique ou hydraulique directement exploitable. Le mouvement alternatif de la houle engendre en effet une force contraire et proportionnelle à la Poussée d'Archimède<sup>10</sup> exercée sur le flotteur qui est captée par l'ancrage et transmise au système. Cette force est en partie utilisée pour actionner une batterie de pistons à double effet, solidaires du flotteur et pour le reste sert à activer simultanément un autre module pneumatique. Les pistons du premier module alimentent et maintiennent en pression un circuit hydropneumatique haute pression comprenant entre autres éléments un réservoir tampon à pression déterminée par l'opérateur et une turbine hydraulique. Ceux du deuxième module agissent comme ressort de rappel pour le retour à zéro, et restituent lors de la phase de descente du support flottant le solde de l'énergie captée à la montée. L'ensemble active en permanence la turbine hydraulique qui entraîne elle-même un générateur électrique rotatif ou tout autre appareil électrique ou hydraulique adapté à l'objectif de production. Quatre modules identiques seront généralement installés dans chaque flotteur. Un poste de transformation et de régulation commun permettra d'envoyer au réseau un courant haute tension conforme aux normes requises par les distributeurs.

La distance vis à vis de la côte est préférentiellement limitée pour des questions de coût du câblage sous-marin et des ancrages, ce qui situe la profondeur d'eau typique à 40 m pour ces systèmes. Les impacts visuels et environnementaux sont très réduits et en cours d'évaluation sur les projets déjà réalisés. Plusieurs modules peuvent être regroupés sous forme de fermes houlomotrices offshore. Dans un site favorable, on obtient 30MW/km². La maintenance est réalisée en zone abritée moyennant un remorquage.



Figure 39 : Systèmes de seconde génération (Source : Sciences et Vie, 2002)

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> La poussée d'Archimède est la force résultante exercée sur un corps plongé en tout ou en partie dans un fluide (liquide ou gaz) dans un champ de gravité.

Les principaux avantages de ce type de convertisseurs d'énergie sont les incidences limitées sur l'environnement, la variabilité saisonnière de l'énergie de vague, qui suit la demande de l'électricité dans les climats tempérés et l'introduction de générateurs synchrones pour un meilleur contrôle de la puissance réactive.

Cette technologie étant encore en cours de développement, un grand nombre de concepts existent. Le plus développé est celui présenté ci-dessus mais il ne serait pas étonnant de voir apparaître de nouveaux types de convertisseurs dans les années à venir. Citons par exemple le « sitter » qui se compose d'un tube submergé dans lequel l'eau s'élève et tombe. Alors que la pression interne change, de l'eau jaillit et de l'électricité est produite. Il existe encore la technique du débordement de chenal. Les vagues s'engouffrent dans un chenal qui se rétrécit de plus en plus. Elles enflent et débordent par-dessus la digue d'un réservoir qui se remplit peu à peu. L'eau du réservoir revient à la mer en passant par une turbine qu'elle fait tourner.

Une autre manière d'utiliser l'énergie des vagues est de s'en servir comme propulseur de navigation. Le dispositif de propulsion convertit partiellement les oscillations multi-directionnelles (haut/bas, frictions, eau/bateau) en une poussée horizontale uni-directionnelle choisie, tout en atténuant ces oscillations et leurs désagréments. En pratique, il s'agit de convertir une partie de l'énergie cinétique générée par les frottements, changements de niveau, changements d'inclinaison, changement des parties immergé et émergées d'un navire avec la surface de l'eau. Un dispositif semblable est utilisé dans l'aviation depuis un siècle et avec succès mais dans des applications opposées. Les avionneurs, la puissance développée par les moteurs, réacteurs poussent l'avion en avant, la disposition des ailes et la position des clapets, convertissent une partie de cette puissance en une poussée verticale. De même, les planeurs convertissent le courant d'air ascendant et/ou la diminution d'altitude en poussée horizontale. Pour la navigation, ce concept est pour le moment de l'ordre de l'idée et aucun projet n'est en cours.

### 3.4.4. Potentiel

Les études récentes assignent pour le secteur du nord-est de l'Océan atlantique (Mer du Nord y compris) des ressources totales disponibles d'une puissance d'environ 290 GW. La figure suivante reprend la puissance moyenne transmise par les vagues sur les côtes européennes en kW par mètre de ligne de côte. En Europe, il est évident que c'est sur la façade atlantique que les puissances sont les plus élevées. Peu de vagues sont en effet présentent dans une mer fermée comme la Méditerranée ou un chenal étroit comme la Manche.

A certains endroits, le niveau énergétique des vagues est particulièrement élevé, avec par exemple plus de 70 kW/m à certains endroits de l'Irlande et de l'Ecosse. Sur la façade atlantique française, la puissance moyenne transmise par les vagues est de l'ordre de 45 kW par mètre de ligne de côte. En intégrant ces données autour des îles britanniques, on obtient une puissance de l'ordre de 120 GW, soit environ quatre fois la demande électrique de ce pays. Pour la France, le même calcul conduit à une énergie annuelle de 417 TWh, très proche de la consommation électrique totale annuelle (450 TWh en 2000). (Ifremer, 2004)

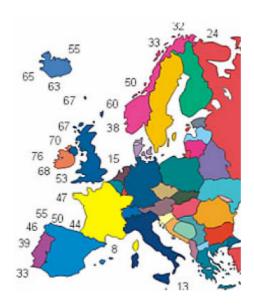


Figure 40: Evaluation de la ressource en courant marin (Source ECRIN, 2004)

Il s'agit là bien sûr d'ordres de grandeur globaux, qui montrent simplement que la récupération de quelques pourcents de cette ressource constituerait un appoint appréciable d'énergie.

# 3.4.5. Impacts environnementaux

Les centrales de première génération, implantées sur la côte, ont certainement un impact très négatif sur un environnement côtier très fragile. C'est certainement une des raisons pour lesquelles, ce type d'installation a été oublié. Une autre raison est le fait que la vague a déjà perdu beaucoup de son énergie une fois le rivage atteint.

Les systèmes de seconde génération, implantés en pleine mer présentent de nombreux avantages. L'impact environnemental est très faible car l'encrage se limite à quelques câbles. Les centrales ne présentent pas d'impact visuel majeur de par leur configuration allongée et de faible hauteur. Un autre avantage est que ces centrales peuvent être remorquées pour effectuer les opérations de maintenance sur terre, ce qui réduit énormément les frais d'entretien et les risques d'accident. Les seuls impacts potentiels négatifs peuvent apparaître avec les vibrations et le bruit induits par ces convertisseurs. Le câble acheminant l'électricité, tout comme pour les autres énergies marines, peut avoir des impacts qui restent à étudier.

Comme on peut le remarquer, cette technologie n'est pas encore arrivée à un point de développement suffisant que pour en connaître parfaitement les impacts (pour les systèmes de secondes générations). Ces différentes études et leurs résultats seront connus d'ici quelques années.

# 3.4.6. Impacts sociaux – Impacts sur les activités humaines

Tout comme pour l'énergie des courants marins, les enjeux sociaux sont semblables à ceux des éoliennes. En effet, le parc étant fermé à toute autre activité, les principaux enjeux sont les conflits d'usage avec la navigation, les pêcheurs, les zones militaires, les câbles sous marins,... Les conclusions sont donc les mêmes et elles ne seront pas répétées ici.

Les créations d'emplois ne seront importantes que lorsque ce procédé se développera plus amplement.

# 3.4.7. Impacts économiques

Les efforts passés ont permis de diminuer fortement les coûts de l'énergie d'origine houlomotrice, comme le montre la figure suivante. Le prix de l'investissement est de l'ordre de 1000 à 3000 €/kW, selon la technologie et les conditions locales. La durée équivalente de fonctionnement à pleine puissance est typiquement voisine de 4000 h/an. Les prix de revient sont de l'ordre de l'éolien offshore actuel, c'est-à-dire de l'ordre de 8 c€ par kWh.

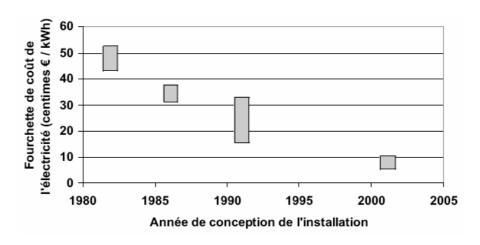


Figure 41 : Prix de revient de l'électricité (Source WAVENET 2003)

A noter que les premiers chiffres sont fournis pour les systèmes de première génération et le dernier (2001), sur des évaluations pour les systèmes de seconde génération.

# 3.4.8. Perspectives

Il est acquis de longue date que le potentiel énergétique des vagues est suffisamment important pour que l'on en envisage l'exploitation, en particulier par le biais de la production d'électricité. Au cours des dernières décennies, un grand nombre de concepts de systèmes récupérateurs d'énergie des vagues ont été développés, notamment en Europe. Si certains systèmes sont aujourd'hui presque parvenus à maturité, avec la mise en place de

prototypes in situ et quelques connexions au réseau, on reste encore loin de la phase de production. La grande diversité des procédés envisagés, tous à des stades plus ou moins avancés de développement, le grand nombre de critères à prendre en compte : variabilité de la ressource, conditions environnementales extrêmes, impact social et environnemental, font qu'il est très difficile, à l'heure actuelle, d'évaluer le rendement et la viabilité de ces dispositifs.

Deux points apparaissent importants pour garantir le développement de la filière « énergie des vagues » et en assurer la crédibilité auprès des investisseurs et industriels. Tout d'abord, les systèmes de récupération de l'énergie des vagues doivent faire la preuve de leur efficacité. Compte tenu du grand nombre de concepts développés à ce jour et n'ayant pas encore été véritablement évalués, il convient de mettre en place des moyens et procédures standardisés d'évaluation permettant de quantifier le rendement réel des systèmes et de les comparer. Ensuite, il faudra garantir la fiabilité de ces dispositifs en tenant compte à la fois des conditions environnementales extrêmes et de la tenue en fatigue des matériaux. Des procédures de certification devront donc être définies et mises en place.

Les méthodes standardisées et recommandations à développer de manière prioritaire portent sur la mesure des vagues et du courant, l'estimation de la ressource (classification des sites), l'évaluation du rendement des systèmes et la réponse aux environnements extrêmes.

Des méthodes standardisées pourront être également développées pour l'évaluation des sous systèmes comme les éléments d'ancrage ou les connections électriques. Il sera bien évidemment intéressant de s'appuyer sur les connaissances des domaines industriels dans lesquels de telles procédures ont été mises en place depuis longtemps, comme par exemple l'exploitation pétrolière offshore.

# Chapitre 4. Tableau récapitulatif

Le tableau suivant propose une synthèse de l'ensemble des énergies marines discutées plus haut. Ce tableau ne prétend pas rassembler tous les éléments d'appréciation nécessaires concernant ce sujet complexe, mais résume les principaux points de la situation actuelle du développement en Europe.

|                                   | Vent                                 | Marée                | Courant                                | Vague                                  |
|-----------------------------------|--------------------------------------|----------------------|--|--|
| Développement<br>actuel           | 612 MW en<br>2004                    | 240 MW (la<br>Rance) | Prototypes de<br>150 à 300 kW          | Prototypes de<br>50 à 750 kW           |
| Ressources<br>européennes         | Importantes<br>(Nord de<br>l'Europe) | Faibles              | Importantes<br>(France et<br>R-U)      | Importantes<br>(façade<br>atlantique)  |
| Disponibilité                     | Discontinue                          | Discontinue          | Discontinue                            | Discontinue                            |
| Prédictibilité                    | Moyenne                              | Excellente           | Excellente                             | Bonne                                  |
| Impacts environnementaux          | Faibles<br>(à étudier)               | Importants           | Faibles<br>(à étudier)                 | Faibles<br>(à étudier)                 |
| Impacts sociaux                   | Moyens                               | Importants           | Moyens à faibles                       | Moyens                                 |
| Coût de l'énergie<br>actuellement | ≅ 10 c€/kWh                          | 3.5 c€/kWh           | ≅ 8 c€/kWh<br>en phase<br>industrielle | ≅ 9 c€/kWh<br>en phase<br>industrielle |
| Perspectives                      | Eoliennes<br>flottantes              | Faibles              | Différents<br>prototypes               | Différents<br>prototypes               |

Tableau 4-1: Tableau récapitulatif

# Chapitre 5. Conclusion

Les mers et les océans sont d'énormes réservoirs d'énergie, renouvelable ou non. De nombreux hydrocarbures sont présents dans les fonds marins et peuvent être exploités comme c'est le cas en Mer du Nord par exemple. Néanmoins, ceux-ci présentent le désavantage de ne pas être compatible avec le développement durable, principalement car leur exploitation génère du gaz à effet de serre. D'autres sources, d'origine thermique et mécanique, peuvent être exploitées. Il s'agit de l'exploitation du vent offshore, des marées, des courants marins et des vagues. Ces ressources, utilisées pour la production d'électricité, sont renouvelables et leur exploitation est non polluante. De plus, elles présentent un potentiel considérable.

L'utilisation du vent et de la marée comme ressource est développée depuis quelques années alors que celle des courants marins et des vagues est en cours de développement, les premiers prototypes étant placés actuellement.

Il ne faut cependant pas croire que l'exploitation de l'énergie marine est la solution parfaite à tous nos besoins. En effet, différents inconvénients sont intrinsèques à celle-ci. Par exemple, l'électricité produite est souvent fluctuante et plus ou moins prédictible, ce qui engendre des externalités économiques (besoin d'autres moyens de production capables de répondre à la demande ou de moyens de stockage).

Les prix de revient de l'électricité semblent actuellement élevés en comparaison avec les filières classiques mais ils seront certainement compétitifs dans un futur plus ou moins proche surtout si le prix de référence des énergies fossiles augmente dans le futur, et si les coûts externes sont inclus dans ce prix. L'usine marémotrice de la Rance prouve qu'une fois arrivée à maturité, l'exploitation de la ressource implique des prix de revient semblables à ceux des filières classiques.

Il ne faut cependant pas se limiter à une analyse économique. Les impacts environnementaux ainsi que les interactions avec les autres usages de la mer doivent être systématiquement étudiés.

De manière générale, mis à part pour les usines marémotrices, les impacts environnementaux négatifs semblent limités. L'éolienne par exemple peut engendrer des impacts positifs grâce à la création d'un récif artificiel sur la base de celle-ci. Pour ce qui est des interactions avec les autres usagers, une concertation à tous les niveaux est indispensable pour répartir au mieux les nouvelles contraintes qui pourraient apparaître. L'exploitation utilise de la place qui n'est plus exploitable pour les bateaux mais peut servir de réserve pour les poissons ce qui pourrait augmenter les prises de pêches aux alentours du site.

Tous ces impacts doivent être évalués au cas par cas pour chaque site.

Le cadre administratif doit être aménagé pour que les projets de démonstration soient facilités et non bloqués par la conjonction de réglementations inadaptées.

Le réseau de transport et de distribution d'électricité doit également être aménagé car il n'a pas été conçu pour accueillir de une grande quantité d'énergie provenant de la mer. Cette adaptation possède des constantes de temps très importantes (de l'ordre de 10 ans) ce qui rend urgent les prises de décision quant à cet aspect de l'aménagement du territoire.

En conclusion, les énergies marines présentent un potentiel énorme qu'il ne faut certainement pas négliger en Europe. En effet, que ce soit au niveau du vent, des courants marins ou des vagues, l'Europe occupe une place privilégiée. Certains pays favorisés par les ressources, comme la France ou le Royaume-Uni, ont tout intérêt à les utiliser.

L'énergie éolienne offshore est déjà bien développée, et on peut s'attendre à une croissance continue. Pour preuves, de nombreux projets voient le jour actuellement. Les nouvelles machines placées sur des bases flottantes offrent d'énormes perspectives.

Les hydroliennes et les houlomotrices sont à l'aube de leur développement industriel. Les premiers résultats obtenus par simulation ou par des prototypes sont très encourageants. Le potentiel est énorme et ces technologies pourraient subvenir à une partie non négligeable de nos besoins en électricité.

Pour ce qui est des marées, très peu de sites offrent l'opportunité d'une exploitation rentable. L'usine marémotrice de la Rance restera sans doute, dans un futur proche, le seul exemple européen.

Le développement de ces technologies dépend également fortement du domaine politique. Comme vu précédemment, un projet qui semble être très prometteur peut être refuser à l'étonnement général sur base d'une plainte d'une habitante. Le cadre politique pour les énergies renouvelables en mer doit être clairement défini.

De plus, afin d'assurer le meilleur développement, le contexte général doit être élaboré dès aujourd'hui. Des subventions devraient soutenir ces technologies propres, les installations électriques doivent être révisées afin de pouvoir recevoir de grands flux provenant de la côte. Les projets doivent être gérés de manière globale en collaboration avec toutes les parties concernées. Et chacun doit mettre un peu d'eau dans son vin pour ne pas se retrouver dans des situations semblables à celle du parc éolien situé au large de Knokke. Car à l'heure où l'énergie est plus qu'indispensable tout comme le développement durable, les ressources renouvelables semblent être la solution la mieux adaptée pour remplacer les filières classiques. Et une grande partie de cette énergie propre peut provenir de la mer.

# **ANNEXES**

ANNEXE I : L'énergie thermique des mers

ANNEXE II : L'énergie osmotique

**ANNEXE III: Glossaire** 

ANNEXE IV : Bibliographie

# I. L'énergie thermique des mers (ETM)

Les mers et les océans sont à la fois un vaste capteur et un immense réservoir d'énergie solaire. Cette énergie est stockée sous forme de chaleur dans les couches d'eau de surface des mers et des océans tropicaux. Les courants marins entraînent cette eau vers les hautes latitudes où elle se refroidit et coule vers le fond des grands bassins océaniques. Après un long voyage plusieurs fois séculaire dans les profondeurs, elle remonte lentement vers la surface dans les régions dites d'upwelling. Ce phénomène de circulation explique pourquoi la température de l'eau décroît avec la profondeur même en zone tropicale où la température de l'eau peut dépasser 28° en surface alors qu'à 1000 mètres de profondeur elle reste uniformément voisine de 4°C.

Ce phénomène naturel est connu des océanographes depuis le milieu du 19ème siècle et ce réservoir d'eau froide sous la surface des océans tropicaux avait suscité l'intérêt dès cette époque. Les bases scientifiques et techniques de la production d'énergie à partir d'une source et d'un puits de chaleur à températures différentes étaient connues et l'approvisionnement énergétique était déjà une préoccupation pour l'industrie naissante.

On attribue au romancier Jules Verne l'idée d'utiliser les « eaux de surface et les eaux profondes des océans pour produire de l'électricité » (1869). Il revient au savant d'Arsonval le mérite d'en avoir jeté les bases scientifiques (1881) et à l'ingénieur Georges Claude celui d'en avoir montré la faisabilité technique et le potentiel économique (1928-1935). Cette ressource énergétique renouvelable solaire est connue sous le nom "Energie Thermique des Mers" ou ETM. Pour être exploitable, la différence de température en la source chaude et la source froide doit être supérieure à 20°C. Cette ressource n'est donc utilisable qu'à certains endroits du globe, principalement dans la ceinture intertropicale.

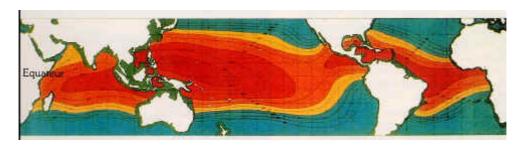


Figure 42: Evaluation de la ressource en ETM (Source: IFREMER, 2004)

La moyenne mensuelle, correspondant à la différence de température entre la surface et 1000 mètres de profondeur, est supérieure à 22°C dans la zone rouge, comprise entre 20°C et 22°C dans la zone orangée, 18°C et 20°C dans la zone jaune et inférieure à 18°C dans la zone turquoise.

D'autres projets sont ensuite étudiés, mais c'est la crise pétrolière de 1973 qui déclenche aux Etats-Unis et au Japon, le financement de la construction de micro-centrales électriques expérimentales, flottantes ou à terre, et d'études de grosses centrales ETM pour la production

d'électricité ou la fabrication de carburants synthétiques. La France contribue à cette relance avec l'étude d'une centrale ETM électrique destinée à la Polynésie Française (1980-1985). Récemment un groupement indo-japonais a annoncé le lancement d'une centrale pilote ETM qui devrait être implantée sur la côte au sud-est de l'Inde.



Figure 43 : Usine "Sagar Shakti" en coopération Indo-Japonaise lancée en 2000 (Source : IFREMER, 2004)

Une centrale ETM se compose d'un ensemble évaporateur-turbine-condenseur, des conduites et des pompes d'alimentation en eaux chaude et froide pompées en surface et en profondeur dans l'océan, et d'une infrastructure abritant tous les équipements nécessaires à son fonctionnement.

L'infrastructure peut être située sur le littoral ou sur un support flottant en mer plus ou moins profonde. L'avantage de l'installation en mer profonde, à la verticale de la ressource en eau froide, est de minimiser la longueur de la conduite et donc le coût et les pertes de charges. En effet, avant que les premiers travaux expérimentaux ne prouvent le contraire, les détracteurs de l'ETM prédisaient que le pompage en eau froide utiliserait à lui seul plus d'énergie que l'usine ne pourrait en produire. En réalité, la puissance pour le pompage de l'eau froide peut être réduite à 20% de la puissance brute à condition d'opter pour des conduites de grands diamètres.

A long terme, l'utilisation de plastiques armés ou de bétons allégés permettrait la construction des conduites de 15 m et plus de diamètre pour des usines flottantes en haute mer de plusieurs centaines de MW produisant des combustibles synthétiques transportables pour l'approvisionnement du marché mondial en énergie primaire.

La ressource ETM est renouvelable, abondante, stable et disponible 24h sur 24 tous les jours de l'année. Elle est largement distribuée et facilement accessible dans tout l'océan dans la ceinture intertropicale. L'ETM ne génère ni chaleur ni polluants mais perturbe des flux naturels d'énergie et de matière. Ces perturbations doivent être établies avant de pouvoir en évaluer leurs effets sur l'environnement.

Le rejet près de la surface d'eau pompée en profondeur est susceptible d'avoir un effet bénéfique sur la ressource vivante, semblable à ce qui se passe dans les zones dites d'upwelling, où les vents créent naturellement une remontée des eaux profondes. Le faible rendement thermodynamique dû au faible écart de température entre les sources froide et chaude requiert la construction d'installations lourdes et les coûts de l'investissement initial restent encore dissuasifs pour les investisseurs privés.

# Autres utilisations de l'eau profonde

L'eau profonde est froide, mais elle aussi est aussi riche en substances nutritives, peu polluée et pauvre en germes pathogènes pour les organismes vivants dans les eaux de surface. Ces propriétés peuvent être utilisées dans une multitude d'applications - associées ou non à l'ETM - et notamment au conditionnement d'air et à la réfrigération, à la production d'eau douce, à l'aquaculture marine, etc. C'est surtout aux Etats-Unis et au Japon que ces applications sont étudiées.

Aux Etats-Unis, c'est au " Natural Energy Laboratory of Hawaii Authority " - le NELHA - que sont concentrés les travaux de recherche sur ce thème. Sur le site de Keahole Point couvrant plus de 400 hectares sur la grande île d'Hawai, le NELHA met à la disposition d'organismes privés et publics des laboratoires pourvus de l'alimentation en eau froide profonde nécessaire à leurs travaux. Les objectifs et les résultats sont multiples et parfois surprenants.

Au Japon, il existe plusieurs laboratoires de ce type à Kochi (1980), à Toyama (1995), Kumejima - Préfecture d'Okinawa (2000). Plusieurs autres localités sont candidates à la construction d'installations similaires qui sont de véritables incubateurs d'entreprises pour le développement de produits et de services utilisant l'eau profonde :

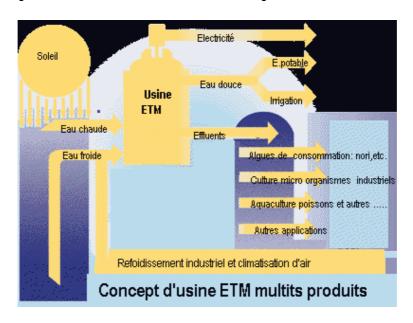


Figure 44 : Concept d'usine ETM - dite "multi-produits" - associant la production d'énergie électrique à d'autres applications de l'eau océanique profonde (Source : IFREMER, 2004)

Cette énergie n'étant pas utilisable sous nos latitudes, elle n'a pas été développée dans ce travail. Elle ne doit cependant pas être négligée pour des pays situés sous les tropiques, qui plus est des pays généralement pauvres. En effet, elle peut représenter un apport d'énergie colossale à moindres coûts lorsque les évolutions technologiques le permettront.

# II. L'énergie osmotique

Si de l'eau douce et de l'eau salée sont séparées par une membrane semi-perméable, l'eau douce va migrer à travers la membrane. Ce phénomène est nommé osmose. Si le réservoir contenant l'eau salée est à une pression supérieure à celle de l'eau douce, l'eau douce migre vers l'eau salée tant que la différence de pression n'excède pas une valeur limite. Avec l'eau de mer, la limite théorique est de 27 bars. En fait, on opère avec une surpression de 10 bars. Un débit d'eau douce de 1m3/s génère alors 1MW. Dans l'état actuel de la technologie, la surface de membrane nécessaire est de 200\_000 à 250\_000 m2 par MW

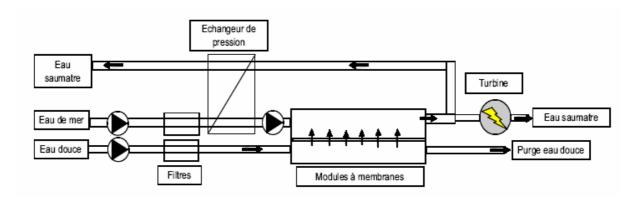


Figure 45: Principe d'une centrale osmotique (Source: IFREMER, 2004)

Un projet européen s'intéresse à cette ressource, et un prototype d'étude est en fonctionnement à Sunndalsøra en Norvège. Le but est de développer les membranes nécessaires au procédé, d'examiner leur tenue dans le temps et de démontrer la faisabilité d'atteindre des coûts acceptables.

# III. Glossaire

#### Anatidés

Famille la plus importante de l'ordre des Ansériformes, elle est constituée des oies, des cygnes, des canards et espèces apparentées.

#### Bar

Le bar ou loup est un gros poisson de mer. Il en existe 2 variétés importantes, le bar commun (surnommé « loup », nom vernaculaire en Méditerranée) (Dicentrarchus labrax) et le bar tacheté (Dicentrarchus punctatus).

# Benthique

De benthos. S'applique à l'ensemble des organismes vivant sur les fonds marins, par opposition à pelagos (loin de la côte), qui comprend le necton (qui nage) et le plancton (que les eaux entraînent dans leurs mouvements).

#### Bernache cravant

La bernache cravant est un oiseau migrateur présent sur les côtes françaises en hiver. Facilement identifiable, c'est une oie à dominante sombre, avec une large tâche blanche au niveau du ventre, s'étendant jusqu'à la queue. Elle apprécie particulièrement les zones humides salées, on la retrouve principalement sur des vasières dans des abris naturels, le plus souvent en colonies qui peuvent atteindre plusieurs centaines d'individus.

#### Black-out

Panne totale de courant sur grand secteur. Habituellement causé par une faille de l'équipement de production ou des installations de transmission.

# Congres

Poisson allongé vivant dans les eaux profondes.

#### Convection

La convection est un transfert de chaleur dû à la fois à la conduction et à un transport d'enthalpie. On parle de convection naturelle lorsque la mise en mouvement du fluide est provoquée par une hétérogénéité de masse volumique dans un champ de forces de volume (pesanteur, force centrifuge, force de Coriolis) et de convection forcée lorsque la mise en mouvement du fluide est provoquée par un moyen extérieur (ventilateur, pompe, ...)

# Electrolyte

Un électrolyte est un milieu conducteur ionique. Il est obtenu par dissolution ou fusion d'un sel, d'un acide ou d'une base. Il est constitué d'un solvant polaire (eau ou solvant organique) et d'un soluté (sel, acide, base). Le solvant polaire, par phénomène de solvatation des ions par une ou plusieurs molécules de ce solvant assure à la fois la dissolution du soluté et sa dissociation ionique en anions chargés négativement et en cations chargés positivement.

#### Ensouiller

Action d'enterrer.

# **Epoxyde**

Les époxydes sont des substances chimiques comportant un oxygène ponté sur une liaison carbone-carbone. On parle également d'oxacyclopropanes (nomenclature systématique).

#### Etale

Moment où la mer, ayant cessé de monter, ne descend pas encore.

#### Exondable

Qui n'est pas inondable.

# Frayères

Lieu où certaines espèces comme les poissons, les grenouilles, les mollusques et les crustacés produisent ou déposent leurs oeufs.

# Générateur électrique

Dispositifs permettant de produire de l'énergie électrique à partir d'une autre forme d'énergie.

# Générateur asynchrone

Machine à induction, c'est-à-dire à courant alternatif et sans connexion entre le stator et le rotor.

# Générateur synchrone

Machine électrique produisant un courant électrique dont la fréquence est parfaitement déterminée par la fréquence de rotation de machine.

# Géomorphologie

Etude des caractéristiques topographiques qui sont à l'origine de la forme et de la formation du relief terrestre.

#### Goéland

Terme générique désignant de nombreuses espèces d'oiseaux marins de la famille des laridés appartenant au genre Larus (qui comprend également des mouettes). Ils sont assez proches des sternes et un peu moins des pingouins. Le mot goéland est un emprunt au breton gouelan. Cette famille comprend notamment les goélands argentés, les goélands bruns, les goélands cendrés et les goélands marins.

#### Grèbe

De la famille des podicipédidés, oiseaux aquatiques de taille petite à grande (de 23 à 74 cm).

# Halieutique

Emprunté, par l'intermédiaire du latin halieuticus, du grec halieutikos, « de pêche ou de pêcheur ». Désigne les ressources aquatiques d'une zone maritime (rivière, lac, mer, océan).

#### Jusant

Moment où commence la marée descendante.

#### Labre

Poisson de la famille des Labridae. Il a le corps marron clair avec une bande plus claire en haut des flancs. Le dos est marqué de 5 à 6 taches rondes beiges de chaque coté et espacées sur la longueur.

# Lançons

Petit poisson marin fusiforme vivant dans le sable, qui constitue un excellent appât pour tous les poissons chasseurs.

#### Lieu jaune

Poisson de la famille des Gadidae.

#### Limicoles

Qui vit dans ou sur la vase; s'applique surtout aux oiseaux.

# Maquereaux

Nom scientifique : scomber scombrus. Poisson téléostéen de haute mer, apprécié pour sa chair et faisant l'objet d'une pêche industrielle.

# Marnage

Amplitude de hauteur d'eau, entre la marée haute et la marée basse.

# Mouette pygmée

Oiseau de la famille des Laridés.

### **PECO**

Les Pays d'Europe Centrale et Orientale sont une notion qui regroupe depuis les années 1980 les anciens pays communistes du centre et de l'est de l'Europe.

# Pélagiques

Qui vivent au large.

#### Pérennité

Caractéristique d'une évolution qui permet de préserver, de maintenir et d'améliorer la qualité des ressources et des équilibres naturels et de ménager l'avenir.

# Plongeon catmarin

Plus petit membre de la famille des Gaviidés. C'est aussi celui qui a l'aire de répartition la plus étendue, nichant dans le Nord de l'Eurasie et du Canada. Sa zone d'hivernage est plus vaste ; il hiverne sur les côtes et les grands lacs.

# Pouvoir calorifique inférieur

Le pouvoir calorifique inférieur est l'énergie d'un combustible libérable par combustion sans récupération de la chaleur de condensation de la vapeur d'eau provenant de la combustion de l'hydrogène.

# Sédimentologie

Branche de la géologie qui étudie les processus de formation des roches sédimentaires et interprète leur condition de transport et de dépôt ainsi que leur évolution au cours du temps.

# Sémaphores

Variable protégée (ou un type de donnée abstrait) constituant la méthode utilisée couramment pour restreindre l'accès à des ressources partagées (ex: espace de stockage) dans un environnement de programmation concurrente

#### Sterne

Appelée aussi estorlet (Sterna hirundo), ou hirondelle de mer. Oiseau de la famille des laridés.

#### Tacaud

Poisson de la famille des Gadidés. C'est un des poissons les plus diététiques, par sa pauvreté en lipides.

#### Taux d'actualisation

Taux appliqué pour apprécier la valeur actuelle d'une valeur future au moyen d'une actualisation. Pour simuler la configuration des investissements dans le secteur privé, le taux d'actualisation est fixé à un montant équivalant au taux de rendement requis dans ce secteur. Pour calculer la valeur sociale des coûts et des avantages, il convient d'utiliser un taux d'actualisation sociale approprié.

### Tourteau

Gros crabe de forme elliptique ayant les extrémités des pinces noires. Aussi appelé "crabe dormeur" ou "dormeur"

#### Turbidité

Réduction de la transparence ou manque de clarté de l'eau, résultant de la présence de matières solides en suspension; eau trouble. La turbidité indique la qualité de l'eau.

# IV. Bibliographie

#### **OUVRAGES ET DOCUMENTS**

# Généralités sur les énergies renouvelables en mer

- Christian Ngô, Ecrin, Les énergies des mers, décembre 2004.
- Bernard Chabot, ADEME, L'économie des énergies de la mer dans une perspective de décarbonisation du secteur énergétique mondial, octobre 2004.
- Régis Kalaydjian, Ifremer, Energie renouvelable marine : l'estimation des impacts économiques, octobre 2004.
- Christophe Levisage, Secrétariat général de la mer, Energies marines renouvelables marines renouvelables et régulation des usages de la mer et régulation des usages de la mer, octobre 2004.

# Energie éolienne

- -Marisa Di Marcantonio, Noémie Laumont, Jan Haelters, Francis Kerckhof, Serge Scory, Dries Van den Eynde, MUMM, Programme de monitoring environnemental d'un projet de parc à éoliennes de 60 turbines de 3,6 MW au large de la côte belge, Projet C-Power, avril 2004.
- Bernard Chabot, Expert senior, ADEME, Premières conclusions tirées de l'analyse économiques des projets éoliens à terre et en mer, Novembre 2002.
- Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable et Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, Guide de l'étude d'impact sur l'environnement des parcs éoliens, 2004.
- ADEME et CLAROM, État des lieux du développement de l'éolien offshore, novembre 2002.
- Electrabel, Etude d'incidence en vue de l'obtention d'une autorisation et d'un permis pour la construction et l'exploitation d'un parc de turbines éoliennes, juin 2001.
- Patrice Walker, Philippe Guibert, Albiol Pau et Eric Grandguillot, Reconnaissances in situ et évaluation des impacts des fermes éoliennes implantées à proximité du littoral.
- Jean-Paul Delpech et Régis Kalaydjan, Ifremer, L'éolien en mer: Impacts environnementaux et acceptation sociale, 2004.
- 3E, Optimal Offshore Wind Energy Developments in Belgium, First intermediary scientific report, 01/01/2002 31/12/2002
- Jacques Ruer, Wilfried Pimenta de Miranda Influence des conditions locales de site sur la conception des éoliennes offshore, ADEME

#### Energie marémotrice

Alexandre Pigeard, L'usine marémotrice de la Rance, 2002

# Energie des courants

- HydroHelix, Approche économique de la technologie hydrohélienne et comparaison avec l'éolien, 2006.
- Sciences et Vie n° 1021, « La ruée vers l'or bleu a commencé », octobre 2002.
- T. Maître et J.L. Achard, La Revue de l'Energie, « Une source d'énergie possible : les hydroliennes », par, juin 2003.
- D.P. Coiro, OWEMES, Exploitation of Marine Tidal Currents: Design, Installation and Experimental Results for the Patented Kobold Vertical Axis Hydro Turbine April 2003.
- A.S.Bahaj ,L.Myers, Analytical estimates of the energy yield potential from the Alderney Race (Channel Islands) using marine current energy converters, Fevrier 2004.
- -Systèmes solaires (l'observateur des énergies renouvelables), n° 152, prospective « 20000 MW sous les mers ? » novembre 2002.
- J.F. Daviau H. Majastre HydroHelix Energies, F. Guena Sofresid Engineering , J. Ruer Saipem SA, Divers aspects de l'exploitation de l'énergie des courants marins, octobre 2004

# Energie des vagues

- Alain Clément, Pat McCullen, Antonio Falcaod, Antonio Fiorentino, Fred Gardner, Karin Hammarlund, George Lemonis, Tony Lewis, Kim Nielsen, Simona Petroncini, M.Teresa Pontes, Phillippe Schild, Bengt-Olov Sjostrom, Hans Christian Sørensen, Tom Thorpe, Wave energy in Europe: current status and perspectives, 2002
- Christophe Maisondieu, L'Exploitation de l'Energie des Vagues : Etat de l'Art et Méthodes Standards, Ifremer, 2004.
- Profile of ocean power delivery LTD, 2004.
- Alain Larivain, Hydrocap, Conversion massive de l'énergie motrice de la houle en électricité depuis un support flottant océanique.

### SITES INTERNET

# Energie (février 2006)

http://energie.wallonie.be http://www.energie-plus.com

# Convention des Nations Unies sur le Droit de la Mer (février 2006)

http://www.un.org

# La loi belge du 20 janvier 1999 sur la protection du milieu marin (février 2006)

http://www.droitbelge.be http://www.juridat.be

# Généralités sur les énergies renouvelables en mer (mars 2006)

http://www.thecarbontrust.co.uk http://www.energie-cites.org http://www.ekwo.org http://www.domsweb.org

# Energie éolienne (mars 2006)

http://www.espace-eolien.fr http://www.ifremer.fr http://www.turbowinds.com/ http://www.windpower-monthly.com/

# Energie marémotrice (mars 2006)

http://membres.lycos.fr/larance/main1.html http://fr.wikipedia.org

# Energie des courants marins (avril 2006)

http://eau.apinc.org http://www.brest-ouvert.net

# Energies des vagues (avril 2006)

http://www.photeus.info http://www.thecanadianencyclopedia.com http://www.iea-oceans.org http://www.energytech.co.uk

#### **COURS**

# Généralité sur les énergies renouvelables

Huart M, Professeur à l'ULB, Cours d'Energie Non Conventionnelle, 2005

# Situation énergétique actuelle

Furfari S., Professeur à l'ULB, Cours Géopolitique de l'Energie, 2005

# **CONTACTS ET VISITES**

- Prof. Jacques C.J. Nihoul, Prof. of Sustainable Development à l'Université Libre de Liège.

- Cyrille Abonnel, Chef de projet Hydrolien, EDF R&D LNHE.
- Kathy Carvalho, Assistante (Science et Innovation), Ambassade de Grande-Bretagne, Paris.

# **SEMINAIRES**

- Journées Transfrontalières en Hainaut ENSIAME-FPMs, « Énergie Environnement : les solutions apportées par l'ingénieur », 23 mars 2006
- Les associations d'Ingénieurs de l'Université Libre de Bruxelles et de la Faculté Polytechnique de Mons, A.Ir.Br. et A.I.Ms, « Avenir de l'énergie et énergies de l'avenir », 8 décembre 2005

Befahy Renaud Juin 2006

# Les solutions offertes par les océans et les mers pour répondre à nos besoins en énergie

# Objectif principal

Etude des différentes solutions offertes par les océans et les mers pour la production d'énergie et plus particulièrement d'électricité en Europe.

Ce travail tentera de répondre à trois questions générales :

- O Quelles technologies peuvent exploiter l'énergie marine?
- O Quel est le potentiel de chacune de ces technologies ?
- O Quels sont les différents impacts engendrés par ces exploitations?

# Objectifs secondaires

# 1. Mise en place du problème

Tout d'abord, différents termes vont être définis afin d'assurer une bonne compréhension. La situation énergétique actuelle et les prévisions seront ensuite abordées. Finalement, le droit et la régulation des usages qui prévaut en mer seront définis car c'est le premier domaine auquel il faut s'intéresser en cas d'exploitation marine.

# 2. Définition de chaque technologie

Chaque technologie est définie. Pour chacune d'entre elles, le principe est expliqué. Les principales caractéristiques (composition, détermination de la puissances, avantages, inconvénients, ...) sont abordées.

# 3. Potentiel

Le potentiel exploitable est déterminé pour chaque technologie afin de se rendre compte de l'importance que la technologie pourrait avoir.

# 4. Impacts environnementaux

Analyse des différents impacts que peut engendrer une installation offshore sur l'environnement.

# 5. Impacts sociaux – Impacts sur les activités humaines

Analyse des différents impacts que peut engendrer une installation offshore sur l'Homme et ses activités.

# 6. Impacts économiques

Analyse des coûts de référence de l'électricité produite par les différentes technologies afin de se rendre compte de la viabilité de celles-ci.

Befahy Renaud Juin 2006

# 7. Perspectives

Prévision du développement de chaque technologie dans un futur assez proche.

# Méthodologie

Ce travail est principalement bibliographique. La première partie de l'étude est consacrée à la recherche et la lecture de documents, d'ouvrages, de sites Internet. Le choix et la synthèse des articles les plus adaptés à ce mémoire forment la deuxième partie.

Une partie plus « pratique » consiste en la rencontre avec Monsieur Nihoul, Professeur d'Océanographie à l'ULg ainsi qu'en les séminaires relatifs à l'énergie et l'environnement auquel j'ai assisté. Cette partie pratique permet de confirmer la partie bibliographique.