

# Énergie des mers

## **Résumé**

*Les énergies renouvelables marines théoriquement exploitables sont nombreuses et variées. On ne considère ici que celles dont on estime que la faisabilité technique est démontrée. Leur exploitation raisonnée permet de produire de l'électricité exportable à terre, et demain de l'hydrogène. Dans la quête de nouvelles sources d'énergie n'émettant pas de gaz à effet de serre, les énergies marines méritent d'être mises à contribution, d'autant plus que notre pays contrôle d'immenses étendues océaniques. Certains pays européens se sont déjà lancés dans la maîtrise de ces énergies à grande échelle et soutiennent activement la R&D et l'industrie.*

*Le développement harmonieux de cette nouvelle manière d'exploiter la mer doit se faire en concertation étroite avec les autres usagers de l'espace maritime. La connaissance indispensable de tous les impacts environnementaux et sociétaux ne peut être acquise que par l'expérimentation in situ d'installations pilotes de taille significative. La France a déjà engagé de facto cette démarche avec le lancement d'un premier appel d'offre pour 500 MW d'éolien offshore. Les énergies hydrolienne et houlomotrice nécessitent des expérimentations au stade de pilotes industriels de tailles beaucoup plus modestes. Le coût associé à ces pilotes est faible au regard de la ressource française qui est considérable et des enjeux potentiels en termes économiques pour les zones littorales.*

*Plus tard au cours de ce siècle, l'énergie thermique des mers constituera une source d'énergie incontournable pour le développement durable de larges zones du Monde.*

## **1. Introduction**

La mer est un milieu fluide riche en flux énergétiques qui peuvent être exploités sous les formes suivantes :

- Énergie éolienne offshore : Le vent est nettement plus fort en mer qu'à terre. Il s'établit sur les vastes étendues libres d'obstacles
- Énergie des vagues (houlomotrice) : Le vent soufflant sur de grandes surfaces marines crée des vagues et concentre ainsi l'énergie éolienne. La houle peut voyager sur de très longues distances et apporter sur une côte de l'énergie qui a été collectée fort loin.
- Énergie des courants de marée : Les marées provoquent de puissants courants qui sont concentrés en certains endroits près des côtes.
- Énergie thermique des mers : Dans l'océan de la zone intertropicale, la différence de température entre l'eau de surface et l'eau profonde dépasse 20°C. L'utilisation d'une machine thermodynamique permet de convertir une partie de la chaleur de l'eau chaude en énergie électrique.

- Énergie osmotique : Une membrane semiperméable mise en contact avec de l'eau douce sur une face et de l'eau de mer sur l'autre face est soumise à une pression osmotique. Ce phénomène peut être mis à profit pour récupérer de l'énergie.
- Énergie marémotrice : le flux et le reflux de la marée est utilisé pour alternativement remplir ou vider un bassin de retenue en actionnant des turbines incorporées dans le barrage créant cette retenue.

L'exploitation de toutes ces énergies est possible et a déjà commencé en divers endroits dans le Monde, à des stades divers de développement. On va examiner ci-dessous la situation pour chacune de ces formes d'énergie et l'évolution envisagée pour le futur. Dans ce texte, on ne s'intéresse qu'aux énergies renouvelables pouvant être utilisées pour la production d'énergie exportable à terre, sous forme d'électricité, ultérieurement d'hydrogène.

Leur exploitation n'implique pas d'apports anthropiques dans la biosphère, contrairement à la combustion d'un fuel fossile ou nucléaire, mais seulement des perturbations de flux naturels d'énergie et de matière. Pour donner des ordres de grandeur réalistes à la ressource exploitable, il conviendrait pour chacune d'elles de faire l'inventaire de ces flux et de la fraction qu'il peut être convenu de perturber sans conséquences graves pour l'environnement.

L'ordre de grandeur de l'énergie naturellement dissipée annuellement par les marées est évaluée à 22.000 TWh soit l'équivalent de la combustion de moins de 2 Gtep (gigatonnes équivalent pétrole). Rappelons que la consommation d'énergie de l'humanité est d'environ 10 Gtep. Le nombre de sites propices à la construction d'usines marémotrices est limité: Les sites étudiés au Canada, au Royaume Uni, en Australie, en Russie etc., représentent un potentiel de production annuelle de 100 TWh. C'est seulement 200 fois la production de l'usine de la Rance (0,5TWh) mais c'est déjà 0,5 % de l'énergie dissipée naturellement par le phénomène! Ces limites conduisent à penser que cette énergie ne pourrait contribuer que de façon très limitée aux besoins futurs d'énergie primaire.

Toutes les autres énergies marines ont pour origine l'énergie irradiée par le Soleil. Le flux solaire moyen absorbé annuellement par l'océan est l'équivalent en chaleur de la combustion de 30.000 Gtep. Un dixième de cet apport (soit 3000 Gtep) contribue, avec celui de l'atmosphère, au transfert de chaleur des tropiques vers les régions polaires, essentiel à l'équilibre climatique actuel. Le Gulf Stream y contribue à lui seul pour près du tiers (soit 1000 Gtep). Ainsi, l'exploitation de 1% du flux naturel de chaleur véhiculé par le Gulf Stream suffirait pour couvrir nos besoins actuels en énergie (10 Gtep)! Mais qui peut prétendre qu'à ce niveau cette exploitation serait sans effets graves sur notre environnement?

Le vent dissipe à la surface des mers une énergie estimée à 40 Gtep. Là encore, on pressent qu'il existe une limite d'exploitation à ne pas dépasser pour ne pas influencer sur la circulation atmosphérique et le climat.

Les conséquences de l'exploitation intensive des énergies marines sous toutes leurs formes sont encore inconnues et un effort de recherche proportionné à leur développement sera nécessaire pour en cerner les limites « durables ».

Toutefois, les valeurs citées plus haut montrent bien l'ampleur des ressources théoriques, et bien que les limites de l'utilisation intensive restent à déterminer, il apparaît que l'utilisation, même très partielle, de ces énergies est extrêmement attractive.

L'exploitation raisonnée des océans, qui doit être mise en œuvre en tenant compte de tous les acteurs nécessitant un accès à une ressource marine ou à une autre, permettra probablement d'obtenir un apport substantiel dans la constitution du cocktail énergétique du futur

## 2. La France maritime

La surface exacte des zones sous juridiction française dépasse largement les 10 000 000 de km<sup>2</sup>.

Le cadre juridique en mer est défini, pour l'essentiel, par la Convention des Nations Unies sur le Droit de la Mer, signée à Montego Bay en 1982, et que la France a ratifiée en 1995.

Cette convention définit un certain nombre de zones maritimes, sous la souveraineté ou sous la juridiction des États côtiers, dont la mer territoriale (souveraineté jusqu'à 12 milles des lignes de base ; en deçà de ces lignes, les eaux intérieures sont soumises au seul droit national) et la zone économique exclusive (ZEE, juridiction jusqu'à 200 milles des lignes de base). Dans toutes ces zones (c'est à dire en règle générale jusqu'à 200 milles au moins de ses côtes), l'État côtier dispose de droits souverains en ce qui concerne les « *activités tendant à l'exploration et à l'exploitation de la zone à des fins économiques, telles que la production d'énergie à partir de l'eau, des courants et des vents* » (art. 56 de la Convention). Il dispose aussi du droit de réglementer « *la mise en place et l'utilisation d'îles artificielles, d'installations et d'ouvrages* ».

Il est donc impossible d'exploiter sans son autorisation les ressources énergétiques de la mer, quelles qu'elles soient (courants, vent, différence de température, houle, etc.) dans les zones maritimes sous la juridiction d'un État côtier.

Ceci est théoriquement possible en haute mer (au-delà des ZEE nationales), mais sans doute techniquement difficile compte tenu de l'éloignement (plus de 350 km des côtes). Les zones maritimes sous juridiction française se trouvent pour l'essentiel outre-mer, la ZEE de métropole et de Corse ne dépassant pas 500 000 km<sup>2</sup>. En Méditerranée, la France n'a pas défini de ZEE, et ses droits en matière d'exploitation de l'énergie ne s'étendent pas au-delà de la mer territoriale (soit 21 km environ de la côte). Rappelons également que la France métropolitaine compte 5500 km de façade maritime.

Dans la quête de nouvelles sources d'énergie, il est donc judicieux qu'un pays comme la France entreprenne d'examiner le potentiel que peuvent apporter les diverses formes d'énergie marines. Ceci doit bien entendu être réalisé dans le cadre d'une gestion rationnelle et concertée de l'espace maritime, car la mer est le théâtre de très nombreuses activités.

## 3. Éolien offshore

### 3.1. Généralités et ressource

L'énergie éolienne n'est pas à proprement parler une énergie marine, mais son exploitation en mer présente des caractéristiques particulières :

- Le vent est plus fort et plus constant en mer qu'à terre, si bien que la productivité des éoliennes est meilleure.
- La mer offre de grands espaces libres d'obstacles, où l'implantation des machines est possible en concertation avec les autres usagers de la mer.

La figure 1 montre l'évaluation de la ressource éolienne pour la Californie et le nord-est des États-Unis (1). On constate que les sites favorables à terre sont peu nombreux, souvent en montagne, alors que la majeure partie de l'espace maritime proche du littoral présente un potentiel important.

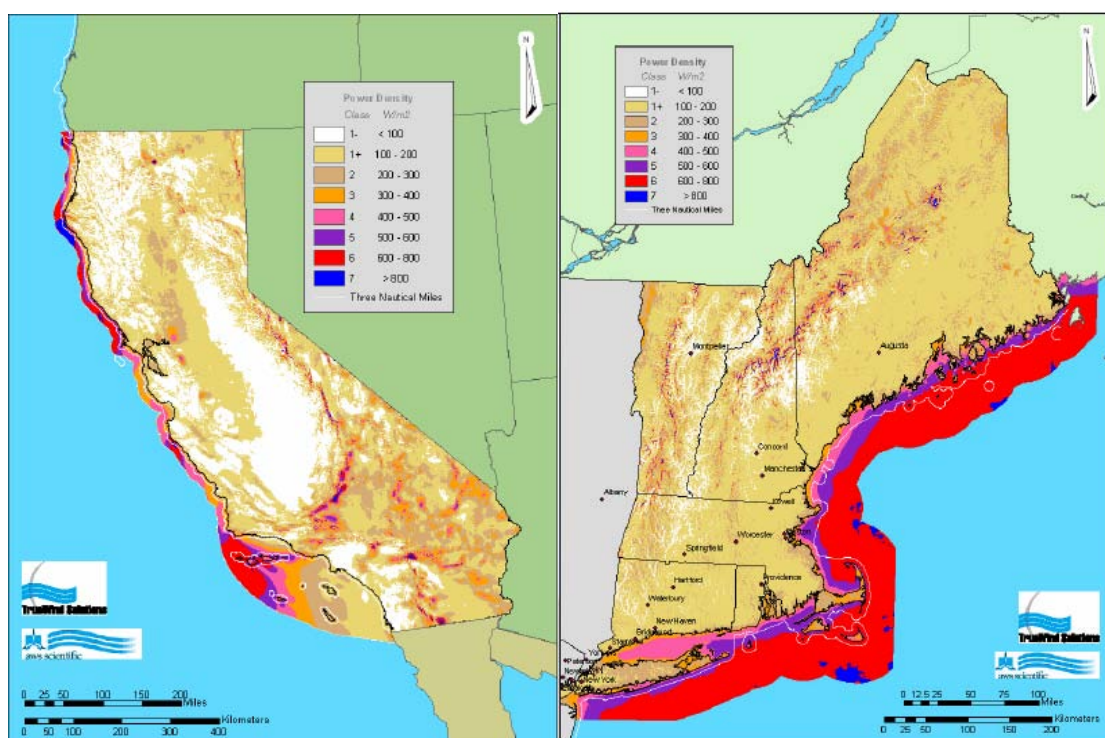


Figure 1 : Comparaison de la ressource onshore et offshore aux États-Unis  
(La ressource est exprimée en puissance moyenne  
par unité de surface balayée par le rotor perpendiculaire au vent)

### 3.2. Particularités de l'éolien offshore

L'implantation d'éoliennes en mer est plus difficile qu'à terre. Le fait que l'éolienne soit entourée d'eau amène en effet les contraintes suivantes :

- L'éolienne est soumise mécaniquement non seulement aux efforts du vent sur les pales et la structure, mais aussi aux efforts créés par la masse d'eau alentour. Ainsi le dimensionnement pour la tenue au chargement extrême et à la fatigue sera différent pour l'éolienne offshore (traînée du courant, impacts de vagues, parfois déferlantes, en plus des efforts du vent et des tempêtes) que pour l'éolienne à terre (vent fort et bourrasques).
- L'éolienne doit être fermement ancrée sur le fond marin. Pour reprendre les efforts, la fondation doit résister à un couple de renversement aggravé par le bras de levier

accru de la profondeur d'eau. Des structures flottantes sont également envisagées à plus long terme, elles réduisent la contrainte sur la profondeur des fonds.

- L'installation des éoliennes en mer ne peut être réalisée que par des moyens d'intervention suffisamment puissants pour offrir une assise stable à la grue chargée du montage des différents éléments.
- Le raccordement électrique nécessite l'installation de câbles sous-marins, jusqu'à la côte, qui peut être distante de plusieurs kilomètres, (voire dizaines de kilomètres lorsque les fonds l'autorisent comme en Mer du Nord). Pour les grandes distances, il faut éventuellement un acheminement en courant continu et associer des convertisseurs électroniques de puissance.
- La maintenance des éoliennes est plus compliquée qu'à terre. Il n'est pas toujours possible d'accéder aux éoliennes, en particulier lorsque le temps est mauvais. Si une panne survient, il peut se passer plusieurs jours avant la réparation, ce qui entraîne une perte de production.

Toutes les difficultés techniques mentionnées plus haut conduisent à favoriser l'utilisation de machines aussi puissantes que possible dans le but de baisser le prix de revient de l'énergie. En effet :

- Pour une puissance de ferme donnée, plus l'éolienne est grande, moins il faut installer et maintenir de machines.
- Pour une profondeur d'eau donnée, plus l'éolienne est grande, moins le coût relatif des fondations est sensible.



Dans le même but, il est également souhaitable que la puissance totale de la ferme soit la plus grande possible :

- Lors de la construction, les coûts relatifs au développement et à la mobilisation des moyens d'intervention sont alors mieux rentabilisés
- Un câble de liaison électrique et un raccordement au réseau correspondent à des coûts qu'il convient d'utiliser au mieux en injectant le maximum d'énergie possible.

*Figure 2 : Éoliennes de 3,6MW à Arklow Bank (Irlande)  
Le bateau de service donne l'échelle. Le rotor a un diamètre de 104 m. Ref : (2)*

### 3.3. Développement actuel

Dans l'état actuel du développement, les éoliennes offshore ont une puissance unitaire de 2 à 5MW. Le rotor a un diamètre voisin de 100m. Elles sont implantées dans 10 à 20m d'eau. La durée équivalente de fonctionnement à pleine puissance est fréquemment supérieure à 3300h. Une ferme offshore a une densité de puissance d'environ 6MW/km<sup>2</sup> d'étendue, soit une productivité de plus de 20 millions de kWh par km<sup>2</sup> et par an.

Les coûts d'investissement et le prix de revient de l'énergie dépendent des conditions précises du projet : profondeur d'eau, qualité du sol, distance de raccordement, nombre et puissance unitaire des éoliennes. Dans l'état actuel de la technologie, l'investissement varie de 1500 à 2500€/kW, voire 3000€/kW dans des conditions difficiles (1650€/kW pour la ferme d'Horns Rev de 160 MW installée fin 2002 à 17 km des côtes du Danemark).

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.

### 3.4. Conditions du développement futur

La nécessité industrielle de réaliser des fermes de grande puissance pour atteindre des coûts acceptables entraîne un besoin important de financement. Les projets éoliens offshore sont des projets ambitieux qui mettent en jeu de grosses sommes d'argent.

Les investisseurs et les organisations bancaires qui s'engagent pour une longue durée (environ 20 ans) ont avant tout besoin d'une bonne visibilité sur la rentabilité à terme des projets. La signature de contrats de rachat de l'énergie à des tarifs suffisants et garantis est essentielle pour que les projets soient lancés.



Figure 3 : Montage des éoliennes de 2,3MW de Nysted (Danemark) par un navire spécialisé  
Mise en place du rotor à 80m au dessus de l'eau (Courtesy of A2SEA)

L'offshore nécessite des moyens maritimes lourds, que l'industrie parapétrolière offshore connaît bien. Ces moyens doivent toutefois être adaptés aux problèmes particuliers de l'éolien (levage à grande hauteur) et les contracteurs ont besoin d'une confiance suffisante dans le marché futur afin d'entreprendre la construction des navires requis.

La livraison vers la côte de grandes quantités d'énergie pose des problèmes d'intégration dans le réseau électrique. De nouvelles lignes haute tension peuvent être nécessaires si on désire profiter d'une ressource locale abondante. Le processus d'instruction et de construction de nouvelles lignes est long (7 à 10 ans).

Tous ces éléments ne peuvent être satisfaits que par une volonté politique clairement affichée et suivie sur une longue période comme cela l'a été dans le passé lors du développement des réseaux électriques.

Certains pays se sont engagés dans cette voie, ce qui permet à l'Europe d'avoir une expérience dans ce domaine.

- Royaume-Uni : À la suite de 2 appels d'offre consécutifs, 15 projets ont obtenu une concession pour un total de 7000MW (3)
- Allemagne : 7 projets ont déjà obtenu une autorisation, pour un total de 1400MW. Le Ministère de l'environnement allemand envisage de développer offshore 25000MW à l'horizon 2030 (4).
- En France, un premier appel d'offre a été lancé pour 500MW, dont les résultats sont attendus vers le début de l'année 2005 (5).

La croissance de la puissance installée conduira dans le futur à des coûts d'investissement plus faibles que ceux rencontrés aujourd'hui. La rapidité de cette décroissance dépendra de l'effort consenti pour industrialiser plus ou moins vite la filière.

Le coût de l'énergie éolienne offshore est actuellement de 70 à 100€/MWh. Ce coût baissera au niveau de 40 à 60€/MWh avec le développement des fermes. Signalons que l'Allemagne a publié une nouvelle tarification pour l'éolien offshore. Les tarifs de rachat vont de 62 à 91€/MWh en 2005 et doivent baisser à 55€/MWh en 2013 (6).

Ces coûts intègrent l'ensemble des dépenses durant toute la vie de la ferme (20 à 30 ans), y compris le démantèlement.

## **4. Énergie des vagues**

### **4.1. L'énergie des vagues (houlomotrice)**

Sur la façade atlantique, la couche des 20 premiers mètres d'eau sous la surface est balayée par une énergie houlomotrice (en moyenne annuelle) de l'ordre de 2,5kW/m<sup>2</sup> de surface verticale perpendiculaire à la propagation de la houle.

On chiffre généralement cette puissance en kW par mètre de front de vague (kW/m) en se ramenant à la surface.

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 suivant, établi pour la façade atlantique française

Solaire	150 W/m <sub>2</sub>	Surface horizontale au sol
Eolien	400 W/m <sub>2</sub>	Surface verticale à 50 m de hauteur
Houle	2500 W/m <sub>2</sub>	Surface verticale entre 0 et 20 m de profondeur

Tableau 1 : Comparaison des densités de puissance moyennes de diverses énergies renouvelables



Figure 4 : Puissance moyenne transmise par les vagues sur les côtes européennes (en kW par mètre de ligne de côte)

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 120GW, soit environ quatre fois la demande électrique de ce pays (T.Lewis ,1993). Pour la France, le même calcul conduit à une énergie annuelle de 417TWh, très proche de la consommation électrique totale annuelle (450TWh en 2000).

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.

## 4.2. Technique

Depuis une trentaine d'années, des systèmes dits de première génération ont été testés dans divers pays (Japon, Inde, Portugal, Royaume-Uni, Norvège). Ils étaient généralement caractérisés par la construction à la côte de chambres d'eau oscillantes. Outre l'impact majeur représenté par l'infrastructure côtière, ces systèmes ne peuvent exploiter que l'énergie qui parvient effectivement au littoral, après dissipation sur les hauts fonds. Deux centrales de ce type, partiellement financées par la CE, sont actuellement en production aux Açores (Pico - 0,4MW) et en Écosse (Islay - 0,5 MW) depuis 2001. Un projet en Polynésie française de technologie Wavegen est en cours de développement avec le soutien de l'ADEME.

Les systèmes de seconde génération sont des installations offshore implantées plus au large. Ils sont conçus pour survivre aux plus fortes tempêtes. L'exemple le plus



représentatif à ce jour est la technique Pelamis de Ocean Power Delivery Ltd dont un module de 750 kW a été raccordé au réseau en Août 2004 (Figure 5) (7). Un projet français de seconde génération (SEAREV) est proposé par l'École Centrale de Nantes et le CNRS, avec le soutien de l'ADEME. D'autres sont en cours de développement.

Les modules offshore peuvent être implantés dans n'importe quelle profondeur d'eau, quelle que soit la nature du fond, contrairement à l'éolien offshore. On préférera néanmoins limiter la distance à la côte pour des questions de coût du câblage sous-marin et des ancrages, ce qui situe la profondeur d'eau typique à 40m pour ces systèmes. Les impacts visuel 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/km<sup>2</sup> (7). La maintenance est réalisée en zone abritée moyennant un remorquage.



*Figure 5 : Exemple de ferme houlomotrice avec plusieurs modules offshore de type Pelamis Ref : (7)*

### **4.3. Coûts**

Les efforts passés ont permis de diminuer fortement les coûts de l'énergie d'origine houlomotrice, comme le montre la figure suivante issue du rapport WAVENET (8).

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.

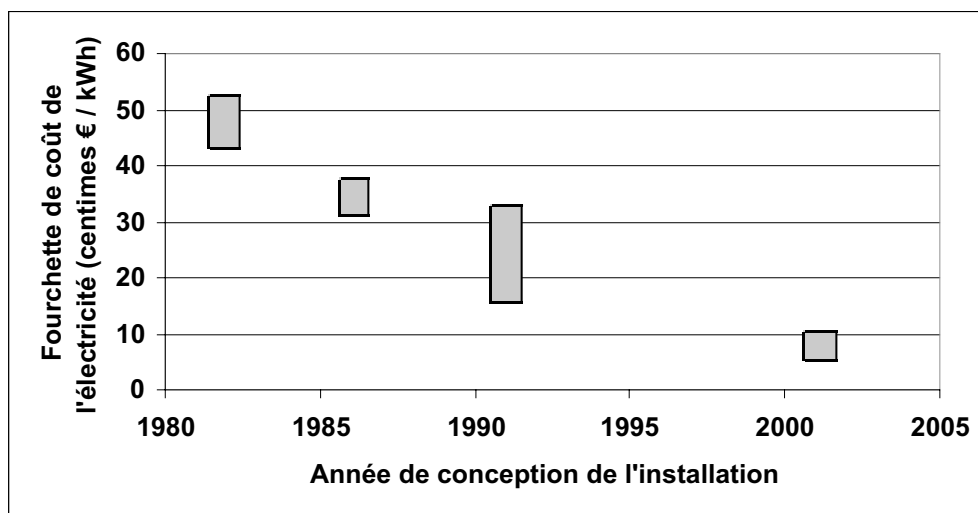


Figure 6 : Évolution du coût de production par les systèmes houlomoteurs offshore (taux d'intérêt : 8%) - Étude WAVENET (8)

Les coûts actuels (50 à 100 €/MWh) sont déjà voisins de ceux des autres énergies renouvelables. L'effet de série devrait avoir un impact significatif dans le cas d'un développement suffisant car nous ne sommes qu'au tout début de la courbe d'apprentissage pour cette filière.

## 5. L'énergie des courants marins

### 5.1. L'énergie des courants (hydrocinétique ou hydrolienne)

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. L'onde de marée est amplifiée dans certaines zones privilégiées par la configuration de la côte. Le littoral de la Bretagne et de la Normandie possède plusieurs sites où les courants atteignent des valeurs importantes : La Chaussée de Sein (3m/s), le Fromveur à Ouessant (4m/s), les Héaux de Bréhat, le Cap Fréhel (2m/s), le Raz Blanchard (5m/s). 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 les sites mentionnés.

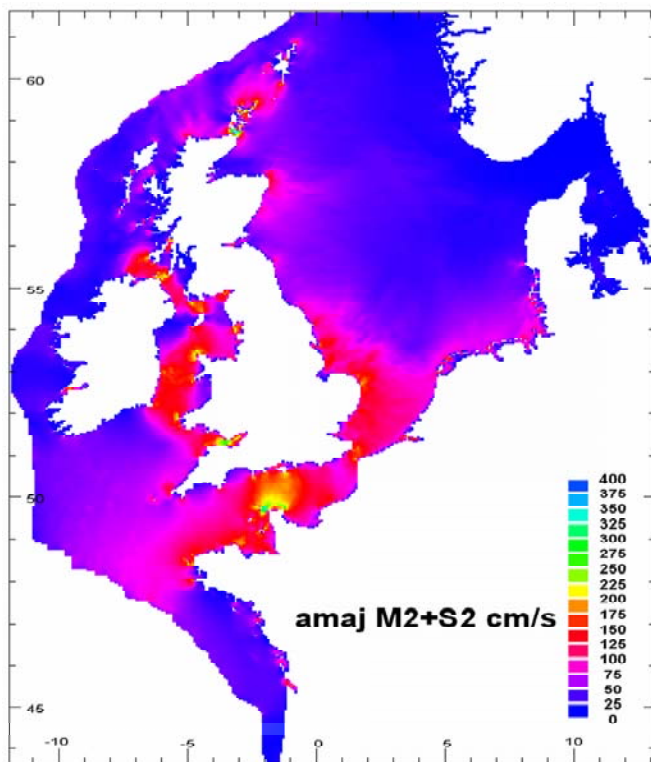


Figure 7 : Carte de la ressource hydrolienne en Europe (Vitesse maximale du courant en cm/s)

Les sites intéressants sont ceux où la vitesse du courant dépasse 175 cm/s sur cette carte. On notera la richesse autour du Cotentin, en certains endroits de la côte nord de la Bretagne, ainsi qu' autour des îles Britanniques

## 5-2 Technique

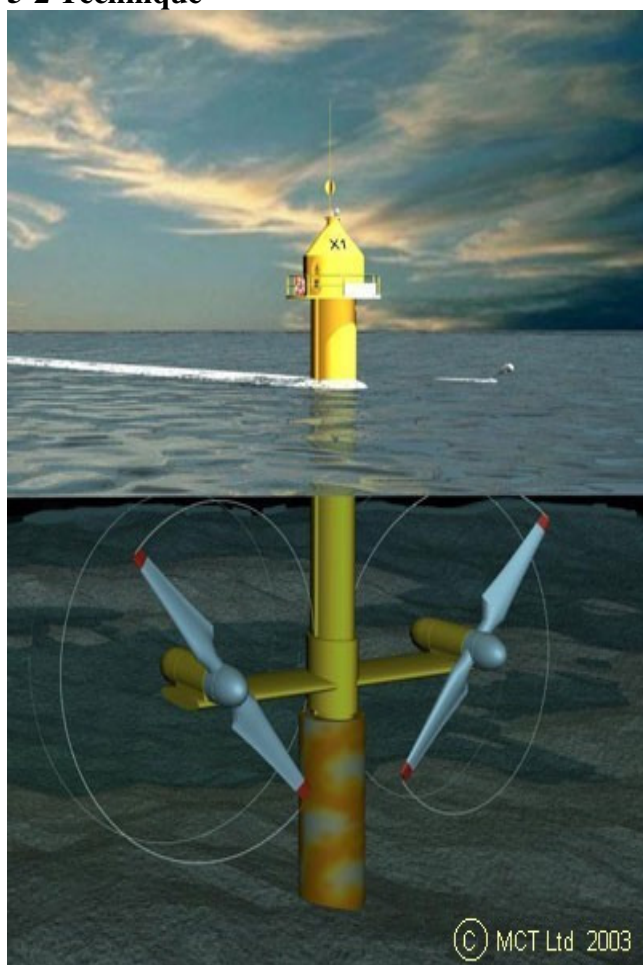


Figure 8 : Vision artistique d'une hydrolienne munie de 2 rotors (Projet Marine Current Turbines Ltd) Ref : (9)

Une installation hydrolienne, peut être assimilée à une éolienne sous-marine. Comme dans le cas des éoliennes, la puissance fournie par un courant qui traverse un m<sup>2</sup> de surface de rotor est donnée par la formule :

$$P = \Omega \cdot h \cdot r \cdot V^3$$

P : puissance en W/m<sup>2</sup> - V : vitesse de l'eau en m/s - h : rendement hydraulique du rotor - r : masse volumique de l'eau de mer, 1024 kg/m<sup>3</sup>

La ressource augmente très vite avec la vitesse du courant, ce qui montre qu'il est intéressant économiquement d'équiper les sites privilégiés par des courants forts.

En tenant compte du rendement hydrodynamique des rotors, la puissance obtenue est de l'ordre de 1,2 kW/m<sup>2</sup> pour un courant de 2m/s et 4 kW/m<sup>2</sup> pour un courant de 3m/s.

Comme les courants les plus forts sont exceptionnels (marées de vives-eaux), on dimensionne électriquement les machines pour une vitesse de courant revenant fréquemment. La durée équivalente de fonctionnement à pleine puissance atteint alors environ 4000 heures par an (10).



*Figure 9 : Photographie d'un prototype d'hydrolienne de 300 kW  
La nacelle est montrée ici avant son immersion dans le courant .  
A droite, vue d'artiste de l'hydrolienne en fonctionnement  
(Projet Marine Current Turbines Ltd) - Réf : (9)*

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 profondeurs d'eau faible et à proximité des côtes. Les machines sont donc de taille modeste (rotors de 10 à 20 m de diamètre) et doivent prendre en compte la variation de niveau, parfois élevée, due aux marées elles-mêmes. L'installation et la maintenance se font avec des moyens maritimes légers. Les impacts visuels et environnementaux sont limités et devront être précisés par des expérimentations en mer accompagnées d'un suivi des impacts.

Les premiers prototypes sont déjà opérationnels en Norvège et au Royaume-Uni (Figure 9).

En France, se déroulent en parallèle deux projets de développement technologique, l'un porté par Hydrohélix Energies et Sofresid Engineering autour de turbines à axe

horizontal (Figure 10), et l'autre porté par l'Institut National Polytechnique de Grenoble (projet HARVEST) autour de machines à axe vertical de type Darrieus (Figure 11).

Ces dernières simplifient notamment la résolution du problème mécanique lié à l'inversion du flux puisqu'elles sont insensibles à la direction du courant. A noter aussi le projet initié par EDF et visant à mettre en place d'ici quelques années un site hydrolien industriel de démonstration de quelques MW dans les eaux françaises, équipé des meilleurs systèmes à cet horizon.

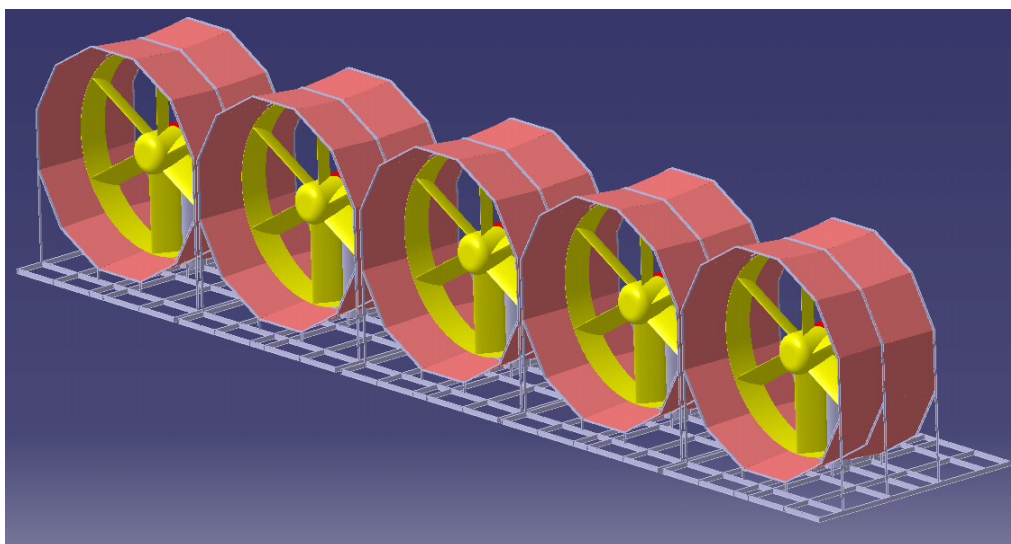


Figure 10 : Schéma d'une installation de 1 MW  
(Courtoisie de Hydrohelix Energies et Sofresid Engineering)

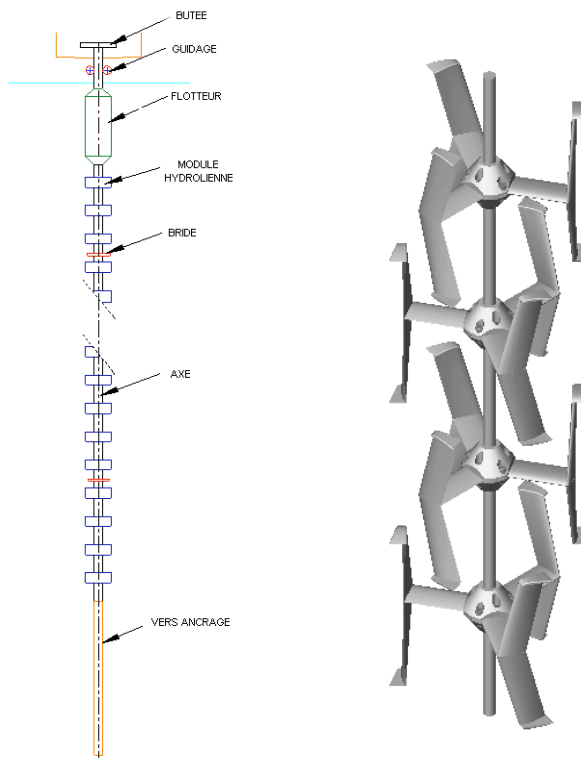


Figure 11 : Projet d'hydroliennes à axe vertical du LEGI.

### 5.3. Coûts

L'expérience déjà acquise à l'étranger (UK) et les développements en cours supposent que lorsque la capacité installée aura atteint 700 MW le coût de l'énergie devrait être d'environ 2 à 4 pences par kWh, soit 30 €/MWh à 60 €/MWh (9).

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

Dans toute la zone intertropicale la température de l'eau de l'océan reste uniformément proche de 4°C à 1000 mètres de profondeur alors qu'en surface elle est supérieure à 20°C. Ce phénomène naturel peut être utilisé pour produire de l'énergie. La ressource et le principe de cette production sont connus sous le nom d'Énergie Thermique des Mers ou ETM.

Une centrale ETM se compose d'un ensemble évaporateur-turbine-condenseur, des conduites et des pompes d'alimentation en eau chaude et froide pompées en surface et en profondeur dans l'océan, et d'une infrastructure abritant tous les équipements nécessaires à son fonctionnement. (11,12)

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 montrent qu'ils avaient tort, les détracteurs de l'ETM prédisaient que le pompage de l'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.

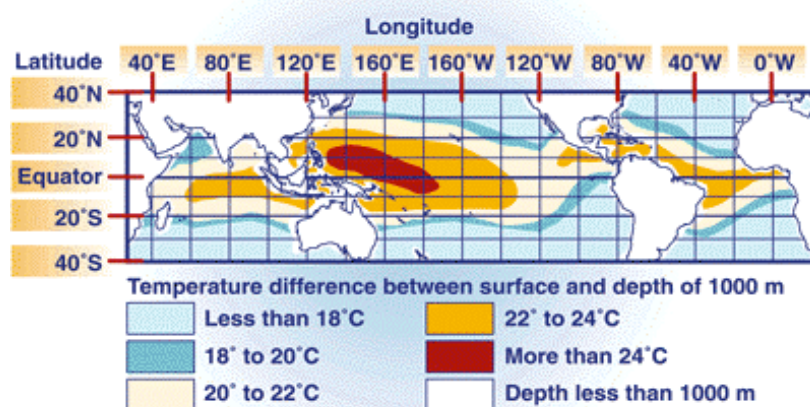


Figure 12 : Étendue de la zone ETM exploitable dans le Monde

Il existe sur le marché des conduites de 1,5m de diamètre en PEHD (PolyEthylène Haute Densité) pour construire des centrales ETM de faible puissance pour répondre aux besoins à court terme en électricité de petites communautés isolées, littorales ou insulaires, en zone tropicale. L'Inde et le Japon ont réalisé un pilote de 1 MW en 2001. (Figure 13). Les États-Unis ont des projets de ce type pour leurs bases militaires d'outre-mer à Diégo Garcia et à Guam. À long terme, l'utilisation de plastiques armés ou de bétons allégés permettrait la construction des conduites de 15m et plus en 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.



*Figure 13 : Photo de la Barge ETM indo-japonaise « Sagar Shakthi » porteuse d'une centrale ETM expérimentale de 1MW.*

*Elle est ici à quai avant son remorquage au large où elle sera équipée pour essais de sa conduite verticale d'amenée d'eau froide en PEHD de 1 mètre de diamètre et longue de 1 000 mètres.*

La ressource ETM est renouvelable, abondante, stable et disponible 24 heures 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. Il conviendra donc de définir la nature et l'ampleur de ces perturbations avant de pouvoir en évaluer leurs effets sur l'environnement.

Notons que 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.

## 7. 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  $1\text{m}^3/\text{s}$  génère alors 1MW.

Dans l'état actuel de la technologie, la surface de membrane nécessaire est de 200 000 à 250 000  $\text{m}^2$  par MW (13).

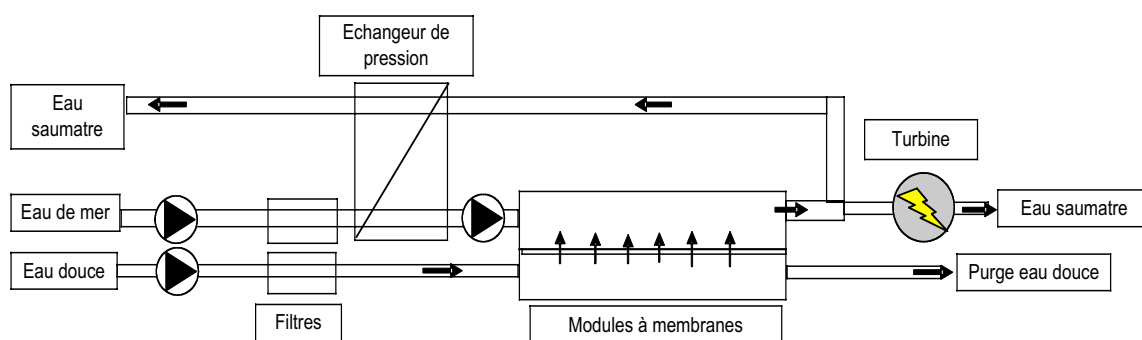


Figure 14 : Principe d'une centrale osmotique

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.

## 8. L'énergie marémotrice

La récupération de l'énergie des marées est ancienne, les nombreux moulins à marée en témoignent. Ce sont des systèmes à barrage et bassin de retenue du type de l'usine de la Rance (240MW installés pour 10 groupes bulbes) qui reste à ce jour la plus grande réalisation mondiale sur ce principe. D'autres réalisations, plus modestes, ont vu le jour au Canada (20 MW), en Chine (quelques MW). D'autres projets comme en Russie n'ont quasiment pas vu le jour à échelle significative ou ont été abandonnés (projet des îles Chausey, de la Severn). Après 35 ans de production sans accident majeur, on peut considérer que la technologie de ces centrales, assez proche de celle des centrales hydrauliques fluviales, est au point.

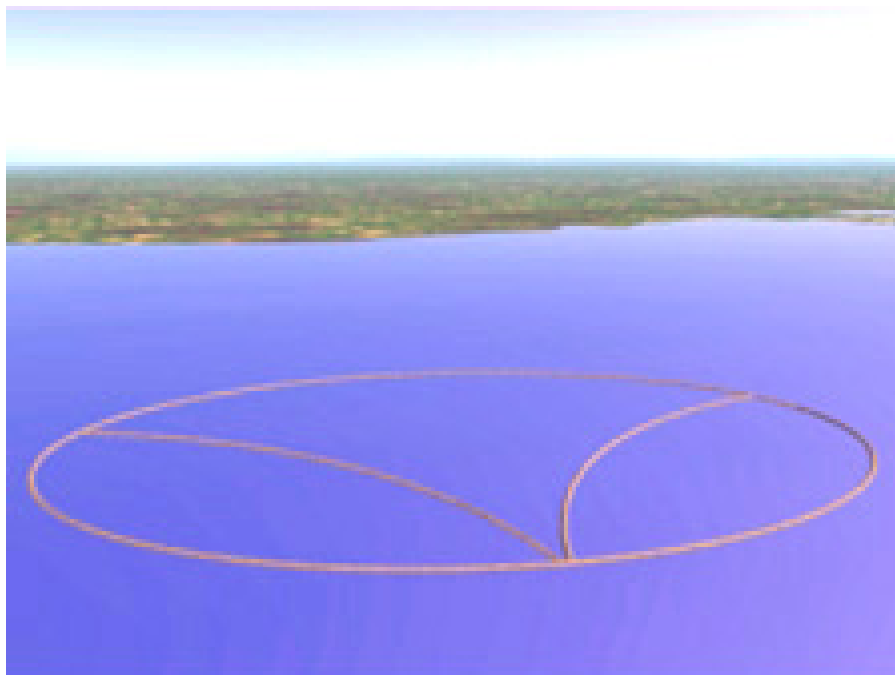
La nature périodique (12h) de la ressource fait que les centrales ne produisent pas en continu, mais seulement 4 à 5 heures par cycle, et donc pas nécessairement en phase avec la demande ; par contre, cette énergie est totalement prédictible. La réversibilité des groupes bulbes a permis d'optimiser la production de l'usine de la Rance, notamment pour pomper de l'eau lors des heures creuses et stocker ainsi de l'énergie.





*Figure 15 : Vue aérienne de l'usine marémotrice de La Rance.*

Néanmoins, 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 un impact environnemental important qui fait que les projets d'envergure ont été abandonnés presque partout dans le Monde, à quelques exceptions près, comme celle 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 (14).



*Figure 16 : Projet Tidal Electric Ltd (14)*

## 9. Conclusions

La mer est riche en énergies renouvelables, d'origine thermique et mécanique. Leur exploitation ne génère **pas de gaz à effet de serre** et est compatible avec les obligations du **développement durable**. La conquête de ces ressources a déjà commencé et le **potentiel est immense**.

Mais l'électricité produite est souvent fluctuante et plus ou moins bien prédictible, ce qui engendre des externalités économiques (besoin d'autres moyens de production capables de répondre à la demande et/ou de moyens de stockage) et/ou des gestions spécifiques de l'énergie produite.

Toutes les filières sont déjà en mesure d'afficher des coûts de l'énergie qui paraissent encore élevés aujourd'hui, mais qui seront compétitifs demain, surtout si le prix de référence des énergies fossiles **augmente dans le futur**, et si le coût de l'émission de carbone était inclus dans ce prix.

Pour que la mise au service de l'homme de ces énergies soit possible, il est nécessaire d'interagir avec le milieu marin. **Les effets environnementaux doivent être systématiquement étudiés**. Les interactions avec les autres usages de la mer doivent aussi être explorées, et la **concertation à tous les niveaux est indispensable** pour répartir au mieux les nouvelles contraintes qui pourraient apparaître. Notons simplement que les diverses activités professionnelles en mer ne s'excluent pas nécessairement les unes les autres, mais qu'une cohabitation sur les zones identiques est souvent possible. Un exemple est fourni par les éoliennes offshore, dont les infrastructures à la mer semblent avoir un effet positif sur la biomasse locale et à proximité, comme cela est montré par le suivi environnemental en cours à Horns Rev (15). La pêche devrait y trouver son profit.

Le démarrage des filières hydrolienne et houlomotrice passe par **la réalisation de projets pilotes** qui permettent de tester la technologie, la viabilité économique, les impacts environnementaux, les interactions avec les autres usagers de la mer, la problématique de l'intégration au réseau, etc. Le coût initial des pilotes (De l'ordre de 10 M€ pour chacune de ces filières) est faible en comparaison des enjeux et des gains potentiels. La recherche correspondante doit être favorisée. **Le cadre administratif doit être aménagé pour que les projets de démonstration soient facilités et non bloqués** par la conjonction de réglementations inadaptées.

Notons aussi que les énergies marines ne pourront être utilisées comme source alternative d'électricité qu'au prix d'une nécessaire **adaptation du réseau de transport** et de distribution qui n'a pas été conçu à l'origine pour les accueillir. 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.

Les sources d'énergie marine sont abondantes, nous l'avons vu, dans les pays de la bordure océanique de l'Europe ; mais il faut souligner que le marché de ces systèmes est mondial et qu'elles pourraient contribuer encore plus substantiellement demain à l'approvisionnement énergétique des **Départements et Territoires d'outre-mer**, et plus largement de toutes les communautés insulaires éparpillées dans les Océans à la surface du Globe, ainsi que des pays ayant une façade maritime. Il s'agit là de zones

d'application des énergies marines **où le développement durable rejoint le marché**, ce qui pourrait en faire dans la décennie à venir les niches idéales pour accueillir les premiers démonstrateurs de la « houille bleue ».

Demain, **le développement des pays du sud** s'appuiera largement sur l'utilisation des énergies renouvelables, dont les énergies marines représentent une source abondante. Comme la technologie nécessaire à cette évolution harmonieuse du Monde est élaborée dans nos pays, il est indispensable que des efforts soutenus soient entrepris et que nous montrions l'exemple. Bien que notre intérêt économique ne soit pas immédiat, les retombées futures pour nous mêmes et pour le reste du Monde deviennent chaque jour plus évidentes.

Le tableau 2 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.

Tableau 2 : Synthèse des énergies renouvelables marines

Énergie	Éolien offshore	Courants et courants de marée	Houle et vagues	Énergie thermique des mers
<b>Développement de la filière en Europe</b>	<b>612 MW opérationnels (mi 2004) 20000 MW en développement</b>	<b>Prototypes de 150 à 300kW en mer</b> Démonstration de 1 MW en développement	<b>Prototypes en mer de 50 à 750kW</b> Fermes de plusieurs MW en développement	Projets anciens non réalisés après le contrechoc pétrolier
<b>Ressource française métropolitaine</b>	+++	++	+++	0
<b>Ressource française DOM-TOM</b>	+	++	++	++++
<b>Disponibilité</b>	Discontinue	Discontinue	Discontinue	Continue
<b>Prédictibilité</b>	Passable, R&D en cours pour amélioration	Excellente	Bonne	Parfaite
<b>Zones favorables</b>	Profondeur d'eau faible	Courants > 2m/s (Proximité côte)	Exposition au grand large	Zone intertropicale (T surface >24°C)
<b>Taille unitaire en 2004</b>	2 à 4 MW (rotors de 100m)	200 à 300 kW	50 à 750 kW	1 MW
<b>Taille unitaire en 2015</b>	6 à 10 MW	300 à 2000 kW	100 à 1000 kW	100 MW
<b>Coût de l'énergie possible après développement de la filière</b>	50 – 100€/MWh vers 2015	50 – 70 €/MWh vers 2015	50 – 70 €/MWh vers 2015	40 - 60€/MWh vers 2020
<b>Stade du développement en France</b>	Appel d'offre 500MW en 2004	2 projets de pilote	2 projets de pilote	Plus d'activité
<b>Pays actifs dans le développement</b>	DK – D – GB – USA –E – IRL – S – NL – B – I – GR - J	GB – N – I - GR – USA – CDN	GB – P – USA – J – D – IN – AUS	IN – J – Taiwan – USA
<b>Retombées emploi local (installation et maintenance)</b>	++	++	+++	++
<b>Impacts sur les autres usages de la mer</b>	Visibilité des éoliennes Partage de l'espace avec la pêche , Câbles Navigation maritime et aérienne	Câbles  Zones de courants utilisées pour la pêche (bar)  Navigation	Câbles  Partage de l'espace  Navigation	Câbles Conduite d'eau froide <i>Positif:</i> Production d'eau douce et fraîche

<b>Frein au développement</b>	Culturel (la mer doit être vide) Coût initial	Culturel Partage de l'espace Besoin de projets pilotes de référence	Culturel Partage de l'espace Besoin de projets pilotes de référence	Coût initial élevé
<b>Impacts environnementaux</b>	À étudier (ex : oiseaux de mer et oiseaux migrateurs)  <b>Positif : Récifs artificiels possibles</b>	À étudier (ex : poissons migrateurs)  <b>Positif : Récifs artificiels possibles</b>	À étudier  <i>Positifs :</i> Diminution de l'érosion de la côte, <b>tranquillisation du plan d'eau,</b> récifs artificiels possibles	A étudier  <i>Positif :</i> Apports de nutriments en surface favorisant la production de biomasse
<b>Remarques</b>	En France, les zones de faible profondeur sont proches du rivage  <b>Éoliennes flottantes à développer, besoin de R&amp;D</b>	<b>La France partage les meilleurs sites</b> potentiels avec le Royaume Uni	La survie des installations aux tempêtes est maintenant bien prise en compte, ce qui résout la principale difficulté technique	- La filière se développera localement pour des <b>services énergie et eau douce</b> - Boom avec des vecteurs énergétiques permettant d'exporter vers les zones de forte consommation
<b>Actions envisageables</b>	Filière déjà lancée (Appel d'offres) Promotion de la recherche sur les éoliennes flottantes <b>Études de suivi des premiers projets, analyse des impacts</b>	Promotion d'un <b>démonstrateur</b> à l'échelle industrielle <b>Coût approximatif : 10M€</b> Études de suivi des premiers projets, <b>analyse des impacts</b>	Promotion d'un <b>démonstrateur</b> à l'échelle industrielle <b>Coût approximatif : 10M€</b> Études de suivi des premiers projets, <b>analyse des impacts</b>	Soutien à la recherche  Collaboration européenne et internationale

## 10. Références

- (1)- AWS Scientific Inc. – NWCC Offshore Dialogue – July 1, 2003
- (2)- [http://www.gepower.com/businesses/ge\\_wind\\_energy/en/image\\_gallery/arklow.htm](http://www.gepower.com/businesses/ge_wind_energy/en/image_gallery/arklow.htm)
- (3)- <http://www.bwea.com/offshore/Round2.xls>
- (4)- [http://www.offshore-wind.de/media/article000329/windenergiestrategie\\_br\\_020100.pdf](http://www.offshore-wind.de/media/article000329/windenergiestrategie_br_020100.pdf)
- (5)- <http://www.cre.fr/fr/marche/appelsdoffres/appelsdoffres.jsp#haut>
- (6)- [http://www.bmu.de/files/ueberblick\\_regelungen\\_eeg.pdf](http://www.bmu.de/files/ueberblick_regelungen_eeg.pdf)
- (7)- <http://www.oceanpd.com/>
- (8)- WAVENET 2000 – 2003 report – Contrat européen ERK-CT-1999/2001  
<http://www.wave-energy.net>)
- (9)- <http://www.marineturbines.com>
- (10)- Divers aspects de l'exploitation de l'énergie des courants marins – SeaTechWeek 2004 – Brest – 20/10/2004
- (11)- <http://www.ifremer.fr/exploration/enjeux/etm/>
- (12)- <http://www.clubdesargonautes.org>
- (13)- Refocus Magazine – November/December 2003
- (14)- <http://www.tidalelectric.co.uk>
- (15) - [www.hornsrev.dk/Miljoeforhold/miljoerapporter/Annual%20Status%20Report-Horns%20Rev-2003.pdf](http://www.hornsrev.dk/Miljoeforhold/miljoerapporter/Annual%20Status%20Report-Horns%20Rev-2003.pdf)

## 11. Contributions

Ce texte publié par ECRIN dans le cadre du Groupe de Travail Énergies Alternatives a été élaboré par les auteurs suivants :

- C. Abonnel - EDF Recherches LNHE
- A. Clément - École Centrale de Nantes UMR 6598
- N. Fichaux - ADEME
- A. Gauthier - IOA – contact : [michel.gauthier3@wanadoo.fr](mailto:michel.gauthier3@wanadoo.fr)
- H. Majastre - HydroHelix Energies
- B. Multon - École Normale Supérieure de Cachan – Antenne de Bretagne  
SATIE UMR CNRS 8029
- T. Maître - LEGI - UMR 5519
- J. Ruer - Saipem SA

Les auteurs expriment leurs vifs remerciements à M. Christophe Le Visage du Secrétariat Général de la Mer et M. Michel Paillard de l'Ifremer pour leurs apports constructifs à cette publication.