

**ASSOCIATION DES RETRAITÉS DU GROUPE CEA
GROUPE ARGUMENTAIRE SUR LE NUCLÉAIRE**

L'ÉNERGIE MARINE

1. INTRODUCTION

Les pays de l'Union européenne se sont engagés à ce que l'ensemble des énergies renouvelables représente en 2020 au moins 20% de leur consommation énergétique.

En France, ces objectifs conduiront à doubler la part actuelle des énergies renouvelables non émettrice de gaz à effet de serre.

Dans ce contexte, la mer possède un potentiel énergétique actuellement peu exploité qui se doit de participer à cette ambition.

Les techniques développées à ce jour relèvent essentiellement du domaine de la recherche. Certaines font déjà l'objet de développements semi-industriels encourageants et les prochaines années devraient voir la part de l'énergie électrique d'origine marine décoller.

La mer est un milieu riche en flux énergétiques pouvant être exploités sous diverses formes :

- l'énergie houlomotrice (énergie des vagues)
- l'énergie marémotrice (énergie des marées)
- l'énergie hydrolienne («énergie des courants marins»)
- l'énergie thermique des mers (utilisant le gradient entre surface et grande profondeur)
- l'énergie osmique (utilisant le gradient de salinité à l'embouchure des fleuves).

Ce secteur quasiment vierge a un vaste espace pour se développer près des côtes de l'Atlantique et de la mer du Nord, pour ce qui concerne les pays Européens.

Ces diverses filières n'en sont pas au même point de leur développement technologique

2. L'ÉNERGIE MARINE DANS LE CONTEXTE ÉNERGÉTIQUE FRANÇAIS

Selon le Commissariat général au développement durable, la France produit environ 1,3 à 1,4 millions de TWh d'électricité dont 12% d'hydroélectricité et quelques % à partir d'éoliennes.

C'est au travers du développement d'énergies renouvelables et faiblement productrices de gaz à effet de serre qu'il faut s'orienter pour participer pleinement au projet européen.

L'énergie marine se place dans ce bon créneau et il est intéressant d'en esquisser ses potentiels techniques, économiques et environnementaux, bien qu'aujourd'hui elle ne contribue qu'à 0,4% de la production hydraulique française avec l'usine de la Rance.

L'ordre de grandeur de l'énergie mondialement dissipée annuellement par les seuls courants de marée est évalué à plus de 20 millions de TWh.

En ce qui concerne la France, métropole, et territoires sous juridiction française, la surface totale des zones maritimes dépasse largement les 10 millions de km² et représente un potentiel de 3000 MW soit 27 TWh par an. Selon une étude « réaliste » de EDF-LNHE, les ressources de la France métropolitaine sont de l'ordre de la dizaine TWh par an.

Au vu de ces chiffres, l'énergie marine ne pourra être que d'un faible apport à la demande, mais elle pourrait apporter des solutions viables dans des conjonctures locales, comme en Bretagne où le rapport consommation/production d'énergie électrique est très déficitaire (la production totale d'électricité représente 8,5 % de sa consommation en 2010).

Concrètement, l'ADME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) a lancé en 2009 un Appel à Manifestations d'Intérêt (AMI) Energies Marines. Cinq projets ont été sélectionnés à l'issue de cet AMI : 2 projets hydroliens (SABELLA D10 et ORCA), 2 projets d'éolien flottant (VERTIWIND et WINFLO), et 1 projet d'houlomoteur (S3).

3. L'ÉNERGIE DES VAGUES (ÉNERGIE HOULOMOTRICE)

L'énergie houlomotrice est en développement avec une floraison de technologies concurrentes (environ 140 répertoriées actuellement).

A l'horizon 2030, selon la Commission Européenne, l'houlomotricité occuperait la quatrième place des énergies renouvelables utilisées pour produire de l'électricité, derrière l'éolien terrestre et offshore et l'hydraulique

La puissance des vagues est une forme concentrée de l'énergie du vent, elle-même issue de l'énergie solaire. On chiffre généralement cette puissance en kW par mètre de front de vague (kW/m).

Une houle de 7 à 10 s de période ayant une amplitude de 2 m transporte en pleine mer un flux de puissance de 40 à 50 kW/m.

En moyenne annuelle, sur les côtes de l'Atlantique la puissance disponible n'est que de 25 kW/m et de 4 à 11 kW/m en Méditerranée. Plusieurs modules peuvent être regroupés en unités de production sur de grandes surfaces avec un objectif raisonnable de l'ordre de 30 MW/km².



Fig 1 : Le système Pelamis testé au Portugal



Fig 2 : Le moulin à marée de l'île Bréhat

Il existe une multitude de projets, la plupart encore au stade d'études ou de maquettes.

On distingue 4 grandes classes de système :

- les systèmes à déferlement
- les systèmes à colonne d'eau oscillante
- les systèmes à flotteurs en surface (Le serpent Pelamis et le projet S3 de SBM marine de Monaco)
- les systèmes immergés

L'exemple le plus représentatif à ce jour en est le projet Pelamis de Ocean Power Delivery Ltd (Fig. 1) dont un module de 0,75 MW de puissance crête a été raccordé au réseau en août 2004 au Portugal. La puissance moyenne annuelle espérée serait de 0,3 MW. Un projet français (S3) est en cours de tests à l'École Centrale de Nantes (Fig 3) utilisera des longs tubes immergés (10 tubes creux de 300 m de long et de 2,5 m de diamètre), incluant des polymères électroactifs qui se déforment sous l'action de la houle en convertissant directement l'énergie des vagues en électricité sans pièces mécaniques intermédiaires. La puissance visée est de l'ordre de 400 kW.

Côté avantages, l'impact visuel et environnemental liée à ces systèmes est plus faible que celui de l'éolien. La technologie robuste utilisée permet des durées de fonctionnement importantes voisines de 4 000 h/an.

Côté inconvénients, des points techniquement durs devront être résolus, tel que l'influence des irrégularités de la houle sur les rendements et la surcharge structurelle, permettant au système de résister aux ouragans (100 fois le poids normal).

Enfin la force des vagues dépend du vent qui est a priori aléatoire, l'énergie produite peut être prévisible mais, n'est pas constante.



Fig. 3 : L'hydrolienne l'Arcouest au large de Paimpol



Fig. 4 : Le barrage de la Rance (EDF Rémi Artiges)

4. L'ÉNERGIE MARÉMOTRICE DANS LES ESTUAIRES

L'énergie marémotrice a été utilisée depuis fort longtemps (Fig. 4).

Les premiers « moulins à marée » ont été construits au Moyen-Âge dans la région de Londres. Les sites adaptés à cette technique sont peu nombreux ; ils se concentrent dans les régions où, du fait notamment des conditions hydrodynamiques, l'onde de marée (inférieure au mètre loin des côtes) est amplifiée avec un marnage (différence de hauteur d'eau mesurée entre les niveaux de pleine mer et de basse mer consécutives) de 7 à 10 mètres. C'est notamment le cas dans l'estuaire de la Rance (Fig 4).

Le Canada a de son côté identifié 190 sites, dont la Baie de Fundy, avec une puissance potentielle totale estimée autour de 40 000 MW, ce qui assurerait près des 2/3 de la demande canadienne actuelle en électricité.

A chaque marée, on stocke le flux de la marée en fermant un barrage établi au travers d'une baie ou d'un estuaire pour utiliser l'énergie potentielle créée par le marnage, comme dans un barrage classique. Les turbines fonctionnent au flux et au reflux.

Les travaux du barrage de la Rance, dans la Baie du Mont St Michel, ont démarré en 1961, et le chantier de l'usine fut définitivement achevé en 1966. Depuis son raccordement au réseau en 1967, l'usine de la Rance dispose de 24 « groupes bulbes » possédant chacun un alternateur de 10 MW, soit une puissance de crête de 240 MW (la puissance moyenne utile est de 60 MW, soit un taux de disponibilité de 25%).

L'exploitation optimale de l'énergie marémotrice nécessite des infrastructures importantes, qui peuvent modifier notablement les équilibres écologiques dans des zones généralement fragiles. Les coûts de maintenance sont aussi relativement élevés.

L'usine marémotrice de la Rance est la principale source d'électricité de la Bretagne. C'est un des premiers programmes d'énergie marine mené à son terme, ce qui permet de faire un bilan sérieux de son fonctionnement. Le taux de disponibilité de l'installation est d'environ 25 %, taux qui est lié à la périodicité et à l'amplitude des marées. L'usine produit 0,5 à 0,6 TWh par an, pour une durée de fonctionnement nominal de 2 000 à 2 500 heures par an. Son coût de production est de l'ordre de 100 € le MWh.

D'aucuns envisagent de créer artificiellement en pleine mer des réservoirs d'eau sous forme de lagons artificiels avec un fonctionnement identique aux usines marémotrices. Ces grands bassins seraient créés en construisant des murs sur le plateau continental, là où l'eau est peu profonde et avec un fort marnage. Le Royaume Uni a sélectionné deux sites, l'un à Blackpool sur la côte Ouest, et l'autre à Washington sur la côte Est. Avec une surface totale de 800 km², la puissance crête serait de 3 500 MW. Les impacts environnementaux de telles installations doivent être étudiés très sérieusement.

5. L'ÉNERGIE DES COURANTS DE MARÉE : LES HYDROLIENNES

Le phénomène des marées se traduit par des déplacements de quantités d'eau considérables et les courants engendrés véhiculent des énergies énormes.

Ces courants peuvent faire tourner des « éoliennes » sous-marines, les hydroliennes, qui obéissent aux mêmes lois physiques. Leur puissance est proportionnelle à la masse volumique du fluide et au cube de la vitesse de ce fluide au travers des pales.

Ainsi une hydrolienne de 10 m de diamètre produira en sortie d'alternateur 125 kW avec un courant de 2 m/s et plus de 450 kW avec un courant de 3 m/s, en tenant compte de pertes additionnelles. Les zones propices sont celles où la vitesse des courants est supérieure à 1 ms⁻¹ et la profondeur d'eau est typiquement d'au moins 20 m pour que la machine puisse avoir une puissance suffisante. Une production pouvant dépasser dans les meilleurs sites 100 MW au km² est envisageable.

Le potentiel européen utilisable est, selon les différentes études, estimé autour 14 000 MW. La Grande-Bretagne possède le plus important potentiel avec près de 10 000 MW.

D'après EDF, la France viendrait en deuxième position avec 3 000 MW « installables », répartis entre la Bretagne et le Cotentin.

Ces courants rapides n'existent qu'à faibles profondeurs et à proximité des côtes. Les machines sont donc de taille modeste (rotors de 10 à 20 m de diamètre maximum).

Une technique pratiquement mature utilise des turbines à axe horizontal avec des pales verticales.

Trois sociétés européennes utilisent ce principe, deux Anglaises avec Marine Current Turbine (MCT) et Tidal Stream et une française avec Hydrohelix Energie :

- depuis 2003, le projet Seaflow utilise deux turbines jumelles montées sur des piles de 3 à 4 m de diamètres et supportant chacune deux hélices de 8 m de diamètre qui produisent une puissance de 300 kW avec un courant de 2,5 m/s
- en 2008, une installation test SeaGen (fig. 6) avec la même conception est installée à Stangford Lough en Irlande du Nord. Elle développe une puissance de 1,2 MW pour des courants de 2,4 m/s avec une durée de fonctionnement qui dépasse les 20 heures par jours. Jusqu'à présent ce prototype a livré plus de 800 MWh au réseau électrique Irlandais
- basée sur la même technologie, deux projets sont en cours de lancement le premier comporte un ensemble de 7 machines de 1,5 MW, chacune sera implantée dans l'île galloise de Anglesey et sera opérationnelle en 2011. Le second sera un ensemble de 66 éléments sur une surface de 4,3 km² et sera implantée près des îles Orkney en 2017. Cet ensemble devrait générer une puissance moyenne de 100 MW.



Fig 5 : Le projet SeaGen, prototype de MTC de 1.2 MW



Fig 6 : Prototype Sabella 03

La Bretagne a aussi investi dans les hydroliennes avec le projet Sabella (SABELLA D10) porté par la société Hydrohélix. Ces turbines posées sur le fond marin, sans emprise en surface, sont stabilisées par gravité et ancrées en fonction de la nature du fond.

Un premier prototype a été mis à l'eau en 2008 dans l'estuaire de Benodet (Il produit des puissances de 10 à 80 kW selon les vitesses des courants), un second projet a été retenu fin 2010.

En juin 2012, un accord a été signé entre Eole Génération, filiale du groupe GDF-Suez, et Sabella. «La Sabella D10», deuxième hydrolienne d'Hydrohélix, sera immergée près d'Ouessant au passage du Fromveur. (Fig. 6).

Ce nouveau projet prévoit un ensemble de 5 turbines de 10 m de diamètre générant une puissance maxi de 1,5 à 2,5 MW chacune (Fig. 7).

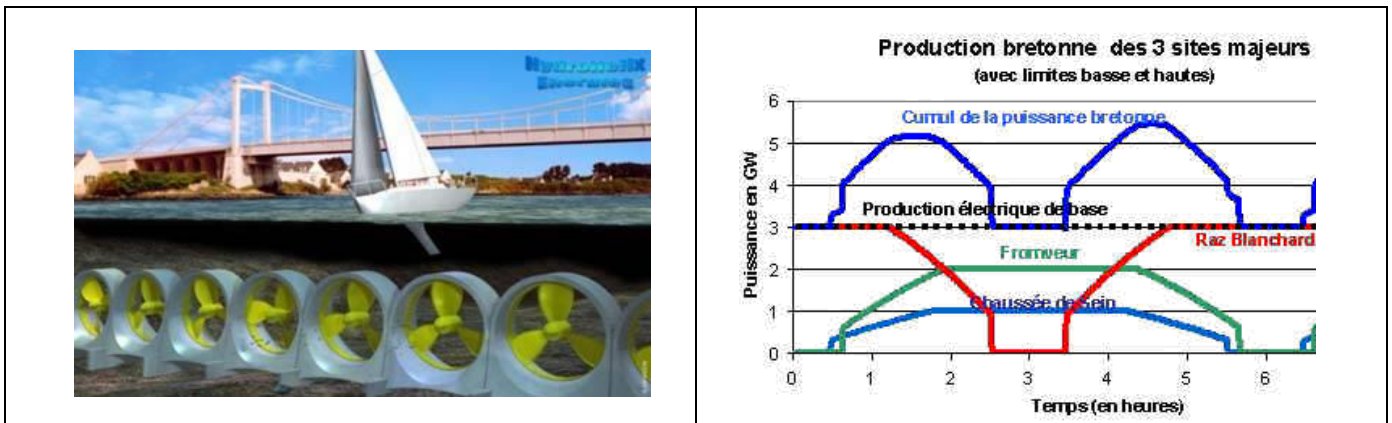


Fig. 7: Le projet Sabella 10

Fig 8

EDF s'intéresse depuis peu à l'énergie marine et des études de faisabilité sont effectuées pour différents sites à forts courants de la Manche (Fig 3) avec La Chaussée de Sein (3m/s), le Fromveur à Ouessant (4m/s), le Cap Fréhel (2m/s), le Raz Blanchard (5m/s).

Du fait de l'échelonnement des cycles de marée pour chaque site, la figure 8 recale dans le temps la somme des puissances produites pour l'ensemble des trois sites actuellement envisagés.

De nombreux autres programmes semi industriels basés sur des technologies innovantes sont en cours d'essais. On peut citer en France :

- le projet BluStream Megawatforce développé par « Le Gaz Intégral (LGI) » et Guinard Energies, France utilise des tuyères accélératrices pivotantes avec effet venturi, où l'eau pénètre dans un conduit conique. En passant dans cet entonnoir, la vitesse des courants est augmentée ; cette accélération décuple la rotation de l'hélice. L'effort est donc mis sur le rendement de la turbine, et sur un coût faible du kWh. Un prototype à l'échelle ½, sera installé dans la Ria d'Étel (près de Lorient), pour prouver la viabilité de la solution.
- les hydroliennes flottantes constituent une technologie plus légère que les hydroliennes immergées, de maintenance plus facile et potentiellement moins coûteuse en investissement, et surtout en coût de fonctionnement et maintenance, mais moins acceptables car entravant le trafic et la pêche, avec aussi des risques en cas de rupture des amarres. La société écossaise ScottRenewables a un démonstrateur d'hydrolienne flottante en essai à l'EMEC.

Ces différents projets font apparaître des avantages certains :

- les courants marins sont prévisibles, on peut donc estimer avec précision la production d'électricité et les taux de production semblent être supérieurs à ceux des éoliennes
- globalement, le potentiel énergétique des courants marins est relativement important, actuellement seuls des espaces restreints à des courants de marée élevés sont aménagés
- l'hydrolienne utilise une énergie renouvelable et elle ne pollue pas
- les hydroliennes sont 25 à 30 fois plus petites que les éoliennes à puissance fournie égale
- la vie sous-marine est paisible, il n'y a pas de tempêtes. Les turbines sous-marines, n'exigeront pas, en fonctionnement normal, des facteurs de sécurité élevés dans leur conception et leurs infrastructures. Elles devront néanmoins résister à la houle superficielle pendant les maintenances
- ancrées dans des zones à très fort courants, les champs d'hydroliennes sont implantés hors des zones de pêche en haute mer. Ils ne devraient pas être une gêne pour les professionnels.

Ces mêmes études révèlent aussi un certain nombre d'inconvénients qui devront être réduits à un niveau « acceptable » :

- les hydroliennes créent des turbulences, qui peuvent modifier la sédimentation et avoir des effets sur la flore et faune
- des poissons ou mammifères marins peuvent heurter les hélices. Ces dernières peuvent être conçues pour tourner très lentement et minimiser ces effets

- pour éviter le développement des algues et le dépôt d'organismes, il faut utiliser un antifongique comme sur les bateaux. Ce produit doit être appliqué régulièrement, ce qui induit un coût d'entretien important et de la pollution
- dans les eaux turbides du fait de la présence de sable en suspension (Pas de Calais, par exemple), l'érosion par le sable des pales d'hélice est très forte. L'entretien doit être fréquent et il est très sensiblement plus compliqué qu'à l'air. Pour cette raison, certaines hydroliennes ont leurs structures mobiles émergeant de l'eau
- il faut penser à acheminer le courant électrique du fond des mers jusqu'à la terre. Cela représente un surcoût non négligeable suivant les sites envisagés (comme pour les éoliennes au large).

Actuellement, les coûts de production électrique sont de l'ordre de 45 €/MWh, soit un niveau comparable aux estimations faites pour les éoliennes terrestres ou au large des côtes. En moyenne, le coût d'installation d'une hydrolienne est de 3,8 M€/MW_{installé}, à comparer au 2,8 M€ pour une éolienne.

Ce coût élevé d'investissement, associé à un tarif d'achat de l'électricité qui pourrait à terme n'être plus subventionné, peut pour l'instant faire reculer les investisseurs.

6. L'ÉNERGIE THERMIQUE DES MERS OU OCÉANOTHERMIE

Dans toute la zone intertropicale la température de l'eau de l'océan reste uniformément proche de 4°C à 1 000 mètres de profondeur alors qu'en surface elle est supérieure à 20°C.

On utilise cette différence de température pour produire de l'électricité, mais également de l'eau douce, du froid pour la climatisation (SWAC) et des produits dérivés pour l'aquaculture suivant le type de processus (cycle ouvert ou le fluide de travail est l'eau de mer ou cycle fermé ou le fluide de travail est un fluide caloporteur spécifique).

Si on prend en compte les masses d'eau mises en jeu, le potentiel énergétique est énorme.

Néanmoins, du fait de la faible différence de température entre les sources chaude et froide, le rendement thermodynamique est très faible (3 à 4 %). Pour produire plus qu'elles ne consomment, ces installations doivent donc brasser des quantités d'eaux très importantes de plusieurs m³/s par MW produit. Elles devront aussi résister aux tempêtes tropicales.

De plus, plusieurs challenges technologiques devront être résolus (tuyau d'eau froide, résistance aux bio-salissures, rejets importants en eaux profondes, ...). Les USA sont actuellement les leaders dans cette branche.

Il est difficile d'avancer des coûts compte tenu du faible degré d'avancement de cette filière. Les coûts d'investissement objectifs vont de 4 500 à 6 000 € par kW installé.

7. CONCLUSION

Nous avons tenté de résumer les différentes possibilités dans l'exploitation énergétique des océans. Avec un potentiel énergétique relativement modeste, nous avons vu que ces filières ont des atouts à faire valoir.

Avec le regain d'intérêt pour les énergies renouvelables non émettrices de GES, la donne commence à changer.

Le développement de la filière marine semble suivre, avec un certain décalage, la même évolution que l'éolien avec une problématique sensiblement identique (rentabilité, pérennité à moyen et long terme, ...), avec un certain nombre d'atouts que n'a pas sa cousine.

Des projets, certes de puissance modeste, en partenariat avec de grands groupes industriels, sont sérieusement envisagés présageant des réalisations semi-industrielles dans les années à venir.

Il paraît évident qu'elle ne peut prétendre à devenir une énergie primaire majeure comme l'est le nucléaire, mais par un développement raisonné, elle pourrait constituer localement (par exemple en Bretagne) un apport dans la constitution du mix énergétique du futur.

Pour être accepté, le développement de ces filières devra se faire dans le respect du milieu marin et en y intégrant ses différents acteurs.

Tableau comparatif des différentes énergies marines

Technologie	Marée motrice	Hydrolienne	Houlomotrice	Thermique
Ressource mondiale (TWh/an)	300	800	80 000	10 000
Prospectives de production selon les scénarii ADME en 2030	0,6 à 1,5 TWh/an	0,3 à 0,6 TWh/an	0,3 à 0,6 TWh/an	0,2 à 0,7 TWh/an (DOM-TOM) 1,6 à 16 TWh/an (SWAC)
Stade de développement	- Industriel pour le marées-moteur classique - Précoces pour les lagons offshores	Avancé	Préindustriel Nombreux projets de technologies différentes	Très précoce
Avantages	- Technologie éprouvée	- Espace nécessaire réduit - Peu ou pas de structures apparentes - Fonctionnement prévisible	- Pas de fondations - Entretien aisé	- Production continue - Production d'eau douce et d'air conditionné
Inconvénients	- Fonctionnement intermittent - Problèmes environnementaux - Faible potentiel mondial	- Fonctionnement intermittent - Entretien compliqué - Zones exploitables restreintes - Peut gêner les activités marines	- Fonctionnement intermittent et aléatoire - Peut gêner les activités marines	- Investissement conséquent - Réservé aux zones tropicales - Complexité technique