

## *Chapitre 4*

### *L'énergie Marine*

## ***Introduction***

La mer a toujours intrigué les hommes tant par sa puissance que par son imprévisibilité. En effet, depuis l'antiquité, ils essaient de la dompter en utilisant par exemple le vent pour la propulsion des bateaux. A partir du XII<sup>ème</sup> siècle, des recherches ont été effectuées pour récupérer l'énergie produite par les marées et la houle.

Malheureusement, en comparaison avec le charbon et le pétrole, ces énergies n'étaient pas rentables car les dispositifs d'exploitation étaient trop onéreux par rapport à la quantité d'énergie produite. C'est pourquoi la recherche dans ce domaine-ci est restée limitée pendant longtemps. Par contre, aujourd'hui, elles reviennent au goût du jour parce qu'elles présentent plusieurs avantages comme le non dégagement de CO<sub>2</sub> ou leur non-exhaustivité et se développent sous différentes formes que l'on appelle énergies marines.

Ce terme d'énergie marine ou **énergie des mers**, fait référence aux énergies renouvelables directement extraite du milieu marin ; entre autre :

- l'énergie des marées, ou énergie marémotrice ;
- l'énergie des courants marins ou énergie hydrolienne ;
- l'énergie marée thermique ;
- l'énergie des vagues et de la houle.

Ces diverses formes sont plus ou moins développées. En conséquence, chacune de ses énergies et des exemples de projets en cours seront présentés.

### ***1. L'énergie marémotrice***

L'énergie marémotrice vient du mouvement de l'eau créée par les marées. Il est possible d'utiliser l'énergie potentiel créée lors de l'élévation du niveau de la mer ou l'énergie cinétique des courants de marée. L'énergie naturellement dissipée annuellement par les marées est évalué à 22 000 TWh soit l'équivalent de la combustion de moins de 2 Gtep (gigatonnes équivalent pétrole). Ce chiffre est à comparer à la consommation d'énergie de l'humanité, de l'ordre de 10 Gtep. Cependant, seule une fraction de cette énergie étant récupérable mais on comprend bien pourquoi cette source durable, qui ne rejète pas de CO<sub>2</sub> peut être intéressante.

L'idée de l'exploiter n'est pas nouvelle. Dès le XII<sup>e</sup> siècle, on trouve des moulins à marée en Grande-Bretagne, en France et en Espagne. En 1607, à Port-Royal, en Nouvelle-Écosse, on construit un moulin qui fonctionne partiellement avec la marée. Ces moulins ne produisent que l'équivalent de 20 à 75 Kw.

Aujourd'hui, les sites adaptés au captage de l'énergie marémotrice restent peu nombreux mais arrive à produire jusqu'à par exemple 500 à 600 millions de kWh par an pour l'usine marémotrice de la Rance.

Mais tout d'abord, commençons par expliquer brièvement les phénomènes de marées pour mieux comprendre comment ce type d'énergie a été et est exploité.

### 1.1. Le phénomène des marées et formation des courants de marée

Chaque jour en un même lieu, la mer monte, puis redescend, cette oscillation périodique du niveau de la mer s'appelle: Marée. Vue de la côte cette oscillation est d'abord perçue comme un déplacement horizontal, en raison de l'arrivée de l'onde de marée sur les côtes. En effet, le niveau de la mer monte avec le courant de flot, qui amène l'eau vers la côte, recouvrant des étendues plus ou moins grandes du rivage (la Pleine mer = PM) et descend avec le courant de jusant, dans le sens inverse, laissant les mêmes étendues à sec (la Basse mer = BM), voir figure 1. Ce sont les astres, principalement la lune et le soleil, qui engendrent les marées. D'une part, la lune gravite autour de la terre et que le couple terre-lune gravite autour du soleil, les forces gravitationnelles mises en jeu se combinent et attirent la surface déformable de l'eau "en faisant monter le niveau" de la mer en un lieu donné. D'autre part la force centrifuge produit le même effet mais dans la direction opposée à celle du bourrelet d'eau créée par la force gravitationnelle.

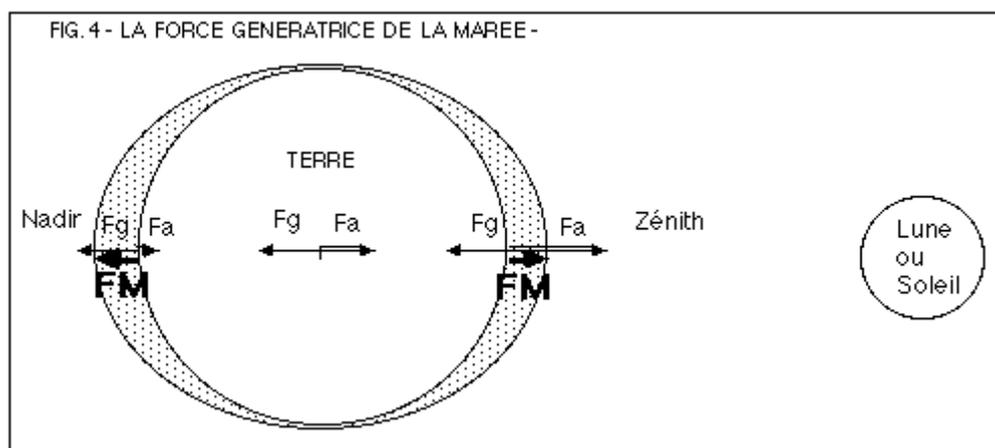


Figure 1 : Forces qui génèrent le phénomène de marée  
( $F_a$ , force gravitationnelle d'attraction et  $F_g$ , force centrifuge)

D'une part, ceci crée une onde dite de marée amenant la pleine mer. Puis, la position des astres étant en perpétuel mouvement, le lieu ne se trouve plus sous l'effet maximal d'attraction et le niveau de la mer redescend à nouveau, dans ce lieu, jusqu'à la basse mer. A ce moment l'onde de marée poursuit ailleurs son trajet, entraînée par les forces gravitationnelles qui la créent. C'est la propagation de cette onde qui est responsable du phénomène de marée.

L'onde se propage avec une célérité dépendant de la profondeur, se réfléchit sur les talus continentaux, générant des interférences qui peuvent être constructives ou destructives, renforçant ou au contraire atténuant certaines fréquences. C'est ainsi que certains bassins océaniques privilégient les composantes semi-diurnes (2 pleines mers et 2 basses mer) tandis que d'autres privilégient les composantes diurnes (1 pleine mer et 1 basse mer par jour). C'est ainsi également que les marnages sont très variables : ils peuvent atteindre 16 m au Canada, dans la baie de Fundy, mais sont parfois insignifiants, notamment dans les mers fermées, telles que la Méditerranée et la Baltique. D'autre part, les marées génèrent des courants dits de « marée » qui sont à distinguer nettement de l'onde marée entre autre par sa nature : contrairement à l'onde-marée, les courants de marée déplacent les eaux.

Ils sont périodiques et se manifestent différemment au large et près des côtes. Au large ils sont giratoires et font le tour de l'horizon pendant une marée complète. Ils tournent, sous l'influence de la force de Coriolis, vers la droite dans l'hémisphère Nord et vers la gauche dans l'hémisphère Sud.

La proximité des côtes transforme le courant giratoire en courant alternatif : il se propage dans une direction pendant la première moitié de la marée et dans la direction opposée pendant la seconde moitié. Le courant qui suit la marée montante est alors appelé courant de flot et celui qui accompagne la marée descendante le courant de jusant. Cependant, le courant de marée est déphasé par rapport à la marée; ce déphasage est quasi nul près des côtes et augmente lorsque l'on s'éloigne vers le large. Ainsi, les "renverses" de courant de marée ne correspondent pas nécessairement aux étales de marée : en Manche, les renverses de courant se produisent à la mi-marée. D'autre part, la vitesse d'un courant de marée est proportionnelle à l'amplitude de la marée et varie selon la morphologie côtière : elle augmente par exemple dans les passages resserrés (chenal) et au niveau de 'pointes' : les courants sont ainsi fréquemment accélérés en Manche, dans le raz de Portland, au cap Lizard ...

En un mot, l'énergie potentielle créée lors de l'élévation du niveau de la mer lors de la propagation de l'onde de marée et l'énergie cinétique des courants de marée présente un intérêt plus ou moins grand à être exploité selon la configuration géographique de la zone considérée. C'est pourquoi, le nombre de site utilisant cette technologie reste restreint.

#### 1.2. Exemple d'une Usine marée motrice : l'usine de la Rance

L'usine marémotrice de la Rance fut conçue en 1943 dans la Baie de saint Malo où les phénomènes de marées sont conséquents par la SEUM (Société d'Étude pour l'Utilisation des Marées). Néanmoins, les premiers chantiers ne débutèrent dans l'estuaire de la Rance qu'en 1961. Il s'agissait entre autre de construire :

- un barrage de 330 m de long qui abriterait les turbines
- une écluse pour le passage des embarcations
- une digue mobile en enrochement de 165 m de long
- un barrage mobile constitué de 6 vannes pour l'équilibrage rapide des niveaux (vidage/remplissage du bassin)

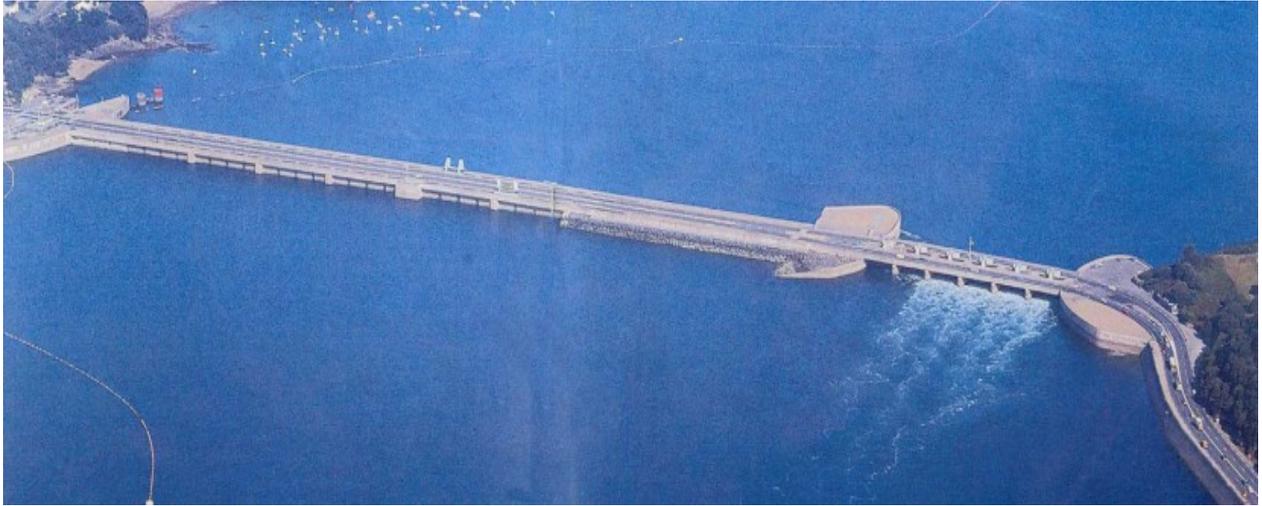


Figure 2 : Usine marémotrice de la Rance

Pour des raisons de commodité et de sécurité, il fut décidé de construire l'ouvrage à sec. Il fallait donc élever deux barrages provisoires pour protéger l'ouvrage de l'eau (côté estuaire/côté mer). Le travail dura 2 ans. En juillet 1963, la Rance était coupée de l'Océan et le terrain asséché pour toute la durée de la construction de l'ouvrage qui exigera encore trois ans de travail. Au total il aura donc fallu vingt-cinq ans d'études, six ans de travaux et 620 millions de francs ( soit plus de 3.5 milliards de francs réactualisés) pour édifier la première usine marémotrice au monde. Elle fut inaugurée le 26 novembre 1967 par le Général de Gaulle et définitivement reliée au réseau E.D.F. le 4 décembre de cette même année.

### 1.3. Le principe de fonctionnement

L'estuaire est fermé par une digue capable de retenir un grand volume d'eau. Dans cette digue sont aménagées des vannes par lesquelles la marée montante remplit le bassin de retenue. 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 le cas du simple effet, la production d'électricité sera donc intermittente et suivra le rythme des marées et non le rythme des activités humaines.

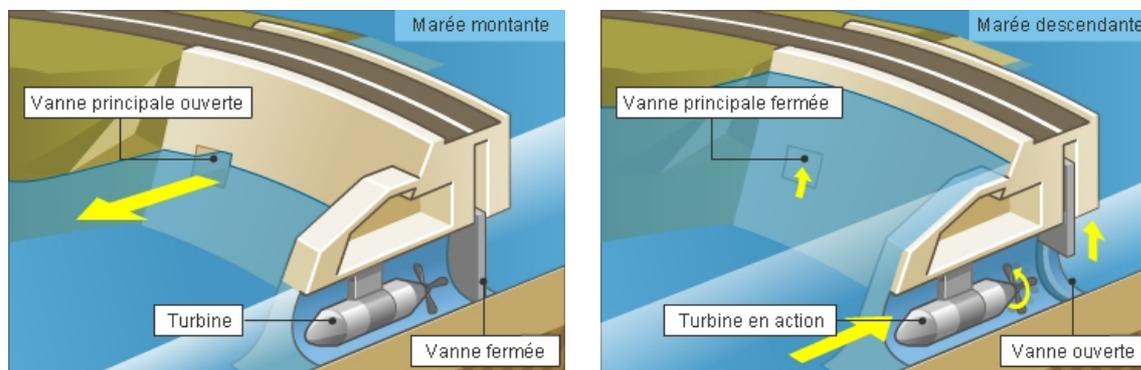
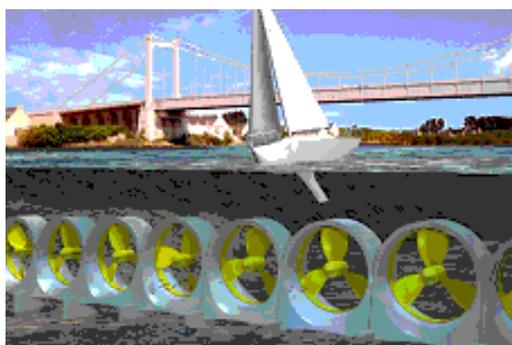


Figure 2 : Principe de l'énergie marémotrice

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. 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.

## 2. L'énergie des courants marins

Comme expliqué précédemment, dans les océans, d'énormes masses d'eau se déplacent, mais à des vitesses faibles (10 à 20 km/h). Ce sont les courants marins, dont une partie est provoquée par les marées. Cette énergie cinétique, « énergie marémotrice sous marine, peut être captée par des éoliennes sous-marines, les « hydroliennes ». Les hydroliennes actuellement étudiées ou testées sont de grandes hélices (comme leurs grandes sœurs terrestres), ou des batteries de turbines sous-marines, fixées sur le fond de la mer par 20 à 40 m de fond, ou flottant entre deux eaux.



a) Système Hydrohélix



b) Hydrolienne

Figure 3 : Système d'hydrolienne (Société Hydrohélix)

### 2.1. Les principaux problèmes des hydroliennes :

Bien que ces systèmes utilisent une énergie inépuisable, non polluante et prédictible, ils présentent de nombreux inconvénient :

- Un coût très élevé dû, entre autres, à des opérations de maintenance lourde ;
- La corrosion des matériaux par l'eau de mer ;
- L'opposition des pêcheurs au chalut, auxquels elles barrent l'accès aux zones où elles sont installées.

### 3. L'énergie thermique des marées

En raison de la surface qu'occupent les mers et les océans de la Terre, ils se comportent comme un gigantesque capteur pour :

- le rayonnement solaire (direct : flux solaire absorbé par l'océan ou indirect : rayonnement de la Terre réfléchi par l'atmosphère terrestre)
- l'énergie du vent (elle-même dérivée de l'énergie solaire)

Bien qu'une partie de cette énergie soit dissipée (courants, houle, frottements, etc..) une grande partie réchauffe les couches supérieures de l'océan. L'océan reçoit annuellement du soleil une quantité d'énergie équivalente à plus de mille fois la demande mondiale en énergie primaire. En théorie, la différence de température entre les eaux de surface des océans (+25° C dans les régions tropicales) et à 1 000 m de profondeur (5° C) constitue cet énorme réservoir d'énergie. Elle est redistribuée entre l'océan et l'atmosphère. Elle est à l'origine des vents, des vagues, des nuages et des pluies, du réchauffement des régions polaires. Elle détermine les climats.

L'idée de prélever une fraction de cette Énergie Thermique des Mers - ETM - pour la transformer en énergie électrique date de plus d'un siècle.

On a émis l'idée d'installer des méga-pompes à chaleur utilisant cette différence de température afin de récupérer une partie de cette énergie. Mais cette réflexion n'a pour l'instant donné lieu à aucun projet récent. Le problème est qu'avec seulement 20° C d'écart entre l'eau chaude et l'eau froide, on se trouve en limite de fonctionnement technique, et le rendement énergétique serait très faible (2 %) pour des investissements énormes.

### 4. L'énergie des vagues ou de la houle

L'énergie des vagues n'est jamais qu'une forme particulière de l'énergie solaire. Le soleil chauffe inégalement les différentes couches atmosphériques ce qui entraîne des courants aériens (vents) eux-mêmes responsables par frottement des mouvements qui animent la surface de la mer (courants, houle, vagues).



Figure 4 : Les vagues créées à la surface des mers sont une source d'énergie à explorer

Les vagues à la surface des mers sont donc créées par le vent. Si le vent souffle suffisamment longtemps il se forme une succession de vagues régulières: la houle. Si elle ne rencontre pas d'obstacles cette houle peut se propager sur de longues distances. La houle est caractérisée par sa « hauteur » de vague  $H$  exprimée en mètre, c'est la différence d'altitude entre le *creux* et la *crête*, par sa *période*  $T$  exprimée en seconde, c'est le temps qui sépare en un endroit donné les passages de deux crêtes (ou bien évidemment deux creux) successives, et aussi par sa longueur d'onde  $L$ .

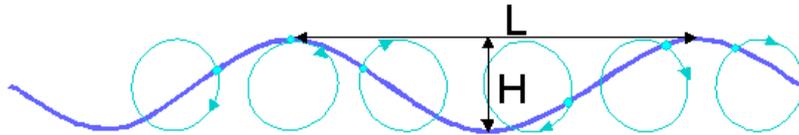


Figure 5 : Schéma montrant certaines caractéristiques de la houle

La quantité d'énergie générée est faible ( $1 \text{ W/m}^2/\text{an}$ , soit 200 fois moins que d'énergie solaire directe). Mais comme les vagues se déplacent de manière très économe, on peut espérer récupérer presque toute l'énergie créée sur de vastes surfaces marines, en installant des capteurs le long des côtes. La puissance théoriquement récupérable est estimée à  $50 \text{ kW}$  par mètre de côte. Le problème est que l'énergie tend à se dissiper lorsqu'on se rapproche de la côte : pour  $50 \text{ kW/m}$  à  $20 \text{ km}$  de la côte, on peut tomber à seulement  $20 \text{ kW/m}$  à  $1 \text{ km}$  de celle-ci. Il faut donc trouver un compromis entre la distance de la côte (les coûts augmentent quand on s'en éloigne) et l'énergie récupérable (qui diminue quand on s'en rapproche). L'énergie des vagues n'est pas la même partout, et elle varie suivant les saisons. Elle est importante en Europe du Nord-Ouest, en particulier le long des côtes britanniques.

#### 4.1. Les techniques

De très nombreux dispositifs ont été expérimentés avec deux grandes catégories : les dispositifs côtiers et les dispositifs de pleine mer (off-shore).

Les premiers utilisent le déferlement des vagues, les seconds utilisent les variations du niveau de la mer lors du passage de la houle. Les premiers sont faciles à construire et à entretenir mais leur rendement est nettement moins bon que les dispositifs off-shore qui exploitent des vagues plus puissantes et plus régulières.

Il existe 3 types de dispositifs pour récupérer l'énergie des vagues :

- des flotteurs en mouvement
- des colonnes oscillantes
- des débordements de chenal

## 4.2. Récapitulatif

Les énergies marines qui ont longtemps été mise de côté pour des raisons de rentabilité, reviennent en force pour le XXI ème siècle. Toutes les sources que l'océan nous offre peuvent être exploitées d'où la multiplicité des projets en cours dans le monde.

Cependant, certains pays sont avantagé quant à leur situation géographique : l'utilisation des marées est intéressante par exemple en grande Bretagne et au nord ouest de la France ; les courants marins sont exploités dans ces mêmes zones ; par contre ce sont les régions tropicales qui sont plus aptes à utiliser l'énergie thermique des mers.

La production annuelle d'énergie primaire que l'on pourrait extraire des énergies marines serait de l'ordre de 120 000 TWh d'électricité.

Ceci est équivalent à la totalité de l'énergie primaire consommée par l'humanité en l'an 2 000 qui était de 10 000 TWh en 2000 avec 15 % de production renouvelable, pour l'essentiel d'origine hydraulique).

Les contributions respectives des procédés de conversion des phénomènes marins à cette production seraient de:

- 800 TWh pour l'énergie des marées,
- 1 400 TWh pour celle de la houle,
- 18 450 TWh pour l'énergie éolienne,
- 100 000 TWh pour la conversion par l'énergie thermique des mers (ETM).

Ces contributions entraîneraient des perturbations :

- pour l'ETM, de 0,02 % du flux de chaleur solaire absorbé par l'océan,
- de 4 % de l'énergie mécanique du vent « offshore », et
- de 2% de l'énergie mécanique dissipée par la marée.

L'exploitation de ces énergies est intéressante car elles sont inépuisables, non polluante prédictibles et gratuites mais la complexité, le coût et les impacts sur les écosystèmes dans lesquelles elles sont utilisées restent des problèmes qui limitent leur utilisation.