



Les énergies de la mer

DE NOUVELLES ÉNERGIES POUR LE FUTUR

Depuis le milieu du ^{xx}e siècle, les pays industrialisés d'Europe et les États-Unis dépendent essentiellement des combustibles fossiles (le pétrole, le **charbon** et le



gaz naturel) pour assurer leurs besoins énergétiques. L'émergence de nouveaux pays à hauts taux de croissance dans les années 1980, dont la Chine et l'Inde, a accentué ce phénomène de dépendance.

Actuellement, les demandes en combustibles augmentent sans cesse et il est à prévoir des difficultés d'approvisionnement en énergie dans les décennies à venir.

Le développement de nouvelles filières énergétiques devient un impératif majeur. Ces énergies du futur devront être disponibles à échelle industrielle pour se substituer aux énergies classiques.

De plus, elles devront être moins préjudiciables pour l'environnement que les combustibles fossiles, dont l'utilisation génère des quantités importantes de composés polluants.

Parmi les filières envisageables, les énergies renouvelables présentent des potentiels particulièrement intéressants. Par énergies renouvelables, on entend toutes les formes d'énergie qui découlent de l'exploitation de phénomènes géophysiques naturels.

Elles sont donc, en théorie, disponibles sans restriction et peu polluantes. Elles regroupent également les énergies dérivées de l'exploitation des phénomènes dynamiques des océans, appelées énergies de la mer.

LA MER, SOURCE INÉPUISIBLE D'ÉNERGIE



L'océan mondial recouvre près de 71 % de la surface du globe terrestre, avec une profondeur moyenne de l'ordre de 3 800 mètres et un volume de plus de 1 300 millions de km³. C'est un milieu ouvert, qui diffuse de l'énergie par

voie mécanique et thermique et agit ainsi sur le climat et l'environnement terrestre. C'est aussi un milieu inhomogène qui présente des variations thermiques importantes, à l'origine d'une fraction de la dynamique des eaux marines. Cette dynamique se manifeste par l'existence de phénomènes de grande ampleur comme les marées et les courants marins. D'autres, comme les vagues, sont des phénomènes plus modérés.

Ces mouvements océaniques ont depuis longtemps été considérés par l'homme comme des sources d'énergie sans fin et potentiellement rentables. De nombreuses tentatives ont été menées pour leur exploitation. Historiquement, c'est l'énergie des marées qui a été la plus anciennement utilisée. Dès le ^{xix}e siècle sont apparus dans certains estuaires et rivières des « moulins à marée », équivalents aux moulins à



vent terrestres. On y utilisait les variations de hauteur d'eau : lors des marées montantes, l'eau s'engouffrait par un étroit conduit et passait à travers les pales du moulin pour aller alimenter un réservoir, le plus souvent un étang. Le passage d'eau produisait une force motrice mettant en mouvement des meules à grain situées à proximité. À marée basse, le réservoir restituait l'eau et faisait fonctionner le système à l'envers.

Plus tard, au ^{xix}e siècle, la nécessité de produire de grandes quantités d'énergie pour l'industrie naissante a favorisé l'émergence de projets de plus en plus nombreux pour l'exploitation des énergies de la mer.

Mais la mer restant un milieu inhospitalier pour l'homme, ce n'est que vers le milieu du siècle suivant que l'exploitation rationnelle et efficace de ces énergies a pu être envisagée. Le principe de base est toujours le même : il s'agit de convertir une énergie potentielle mécanique ou thermique en énergie électrique utilisable par l'homme.

Actuellement, grâce aux importantes avancées technologiques des dernières décennies, de nombreux projets d'exploitation des énergies de la mer sont développés dans le monde. Bien que la plupart des systèmes élaborés soient encore à l'état d'expérimentation, certains sont opérationnels à échelle industrielle et présentent des résultats prometteurs. Les filières

énergétiques qui sont les plus intéressantes du point de vue des rendements obtenus sont celles qui se rapportent aux trois principaux phénomènes dynamiques des océans : les marées, les vagues et les courants marins.

LES FILIÈRES ÉNERGETIQUES

L'ÉNERGIE MARÉMOTRICE

Le phénomène de marée est lié à l'attraction gravitationnelle de la Terre avec la Lune et le Soleil. Sur Terre, ces interactions entraînent des déformations importantes des surfaces marines. Les déformations provoquent la montée et la redescende périodique des eaux près des côtes bordant les océans, dont les niveaux marins varient de façon plus ou moins importante (de quelques mètres à plus de 20 mètres dans la baie d'Ungava au Canada).

Aux masses d'eau mises en mouvement par les marées correspondent des potentiels mécaniques énormes. L'ordre de grandeur d'énergie dissipée annuellement par les marées est équivalent à la quantité d'énergie dégagée par la combustion de près de 2 Gtep (Gigatonnes équivalent pétrole, soit 2.10⁹ tonnes de pétrole). En comparaison, la consommation d'énergie totale de l'humanité se situe autour de 10 Gtep par an. Par contre, le phénomène de marée se manifeste sur de grandes distances et l'énergie marémotrice, bien qu'importante, est malgré tout une énergie « dispersée ».

La façon la plus efficace de limiter cet effet de dispersion a été de tirer partie de la concentration naturelle de marées en certains lieux de topographie bien définie. Les marées présentant aussi l'avantage d'être hautement prévisibles en fréquences et intensités, il a été possible de construire, dès le début des années 1960, des centrales marémotrices dont les rendements pouvaient être calculés de façon précise. Ces centrales représentaient les premières filières d'exploitation d'énergie de la mer utilisables à échelle industrielle.

En France, par exemple, la **centrale marémotrice de la Rance** est en



activité depuis 1967. Établie sur l'estuaire de la Rance, entre Dinard et Saint-Malo, dans les Côtes

d'Armor, la centrale profite de marées qui sont parmi les plus importantes au monde (presque 14 mètres entre la basse et la haute mer). Le principe de fonctionnement de la centrale marémotrice est équivalent à celui d'un moulin à marée. Les flux et reflux périodiques d'eau y sont utilisés pour remplir puis vider, alternativement, un bassin de retenue installé en amont de la centrale sur l'estuaire. À chaque fois, le **transfert d'eau**



actionne des groupes convertisseurs d'énergie à turbine, incorporés dans le barrage. Chaque turbine est constituée d'un système rotatif à hélices couplé à un générateur de courant qui transforme l'énergie motrice de l'eau en électricité. Le site de la Rance a une puissance installée de 240 MW (millions de watts) qui produit annuellement une quantité d'énergie de l'ordre de 500 GWh (Gigawatts par heure). Longue de 332 mètres, la centrale marémotrice est la seule réalisation au monde d'une telle dimension. Le site est très rentable et satisfait à lui seul 3 % de la consommation électrique totale de la Bretagne, ce qui représente les besoins en électricité d'une ville de 300 000 habitants. De plus, la maintenance de la centrale est aisée et nécessite peu de personnel.

Par contre, le coût environnemental de l'ouvrage n'est pas négligeable. La centrale barre totalement l'estuaire de la Rance. Ceci a provoqué dès le début de son exploitation un ensablement du site. L'écosystème local en a été profondément modifié.

Actuellement, les centrales marémotrices continuent à être construites en différents endroits du monde, mais les contraintes environnementales liées à leur technologie limitent leurs potentialités. La filière d'exploitation d'énergies des marées n'apparaît plus aujourd'hui comme la voie la plus intéressante pour l'avenir.

L'ÉNERGIE HOULOMOTRICE

L'exploitation de l'énergie des vagues, ou énergie houlomotrice, est plus récente que celle des marées, mais elle présente des potentialités plus importantes. Les vagues sont des ondulations périodiques des surfaces marines dont l'intensité et la direction dépendent essentiellement de l'action des vents. À la différence des marées, elles

représentent des mouvements d'eau modérés, mais sont innombrables et l'énergie mécanique de l'ensemble des vagues est, elle aussi, énorme. On estime son potentiel mondial entre 1 et 2 Terawatts. C'est une valeur du même ordre de grandeur que la puissance électrique mondiale utilisée actuellement.

Les vagues sont des phénomènes aléatoires et ne sont pas prévisibles d'un jour à l'autre. De plus, leur intensité peut varier fortement suivant les saisons. Ainsi, durant l'été, la puissance des vagues est généralement de l'ordre de quelques dizaines de kW/m (kilowatts par mètre). Mais lors de tempêtes hivernales, elle peut atteindre facilement plusieurs centaines de kW/m. La prise en compte de ces contraintes a longtemps posé de véritables défis technologiques à dépasser.

Les centrales houlomotrices doivent être équipées de capteurs d'énergie suffisamment sensibles pour extraire l'énergie de vagues de faible puissance. En même temps, elles doivent être assez robustes pour supporter sans dommages les perturbations hivernales. Des centaines de brevets d'extracteurs d'énergie houlomotrice ont été élaborés sans résultats satisfaisants.

Les systèmes véritablement compétitifs ne sont en activité que depuis la fin du ^{xx}e siècle. C'est le cas, par exemple, de la centrale houlomotrice Limpet qui fonctionne depuis 2000 sur l'île écossaise d'Islay. La centrale comprend une turbine positionnée au dessus du niveau maximal atteint par les crêtes de **vagues**. La turbine



est emprise dans une chambre étanche rigide maçonnée. Cette chambre est construite de façon à ce que l'extrémité basse de ses parois baigne dans la mer. Sous l'effet d'une vague, l'eau remonte dans la chambre et l'air présent est chassé à travers la turbine, ce qui la met en mouvement. Le mouvement produit de l'électricité par convertisseur électromécanique. Lors de la redescende de l'eau au moment du creux de vague, l'air est aspiré dans la chambre à partir de l'extérieur de la turbine et remet le système en mouvement dans l'autre sens. La turbine est donc activée en deux temps par l'air qui déplace les vagues. Le mouvement se produisant plusieurs fois par minutes, l'énergie produite

De l'énergie en quantité

13,7 TWatts

Puissance moyenne consommée dans le monde annuellement

39 %

Proportion de l'électricité mondiale produite par combustion du charbon.

3 milliards

Nombre de personnes dans le monde qui ne disposent pas de l'électricité.

500 kW

Puissance générée par une centrale Limpet.

1,4.10¹⁵ watts

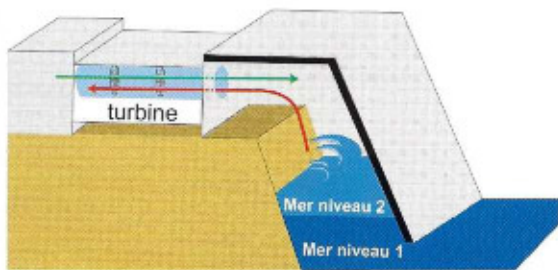
Flux de chaleur véhiculé par le Gulf stream.

Centrale de la Rance



332 m de long

Centrale Limpet



Quand le niveau de l'eau monte, l'air est comprimé dans la chambre. Il circule alors à travers la turbine qui entre en rotation et produit de l'énergie.

accumulée devient rapidement significative. La centrale Limpet génère une puissance de l'ordre de 500 kW. Elle satisfait les besoins électriques de près de 400 foyers écossais. En plus de ses rendements importants, la centrale Limpet présente comme avantage de ne nécessiter que peu de charges d'entretien et de ne pas créer de gêne au trafic maritime. Les autres modèles de centrales houlomotrices développés actuellement utilisent directement l'eau de mer pour mettre en mouvement les convertisseurs d'énergie. C'est le cas de la centrale Seawave Slot-cone Generator (SSG), installée sur l'île de Kvitsoy, au large de la Norvège. Le système est construit en plan incliné sur le front de mer. Lorsque les vagues se projettent sur la centrale, l'eau remonte la pente et dévale à travers plusieurs siphons aménagés dans l'ouvrage. Des turbines sont positionnées au passage de l'eau. Elles sont mises en mouvement et produisent alors de l'électricité. Il existe plusieurs variantes de la centrale SSG, dont certaines ont été aménagées en systèmes flottants. Ces centrales houlomotrices sont difficiles à mettre au point et leur entretien est plus délicat que les installations de rivage. Mais ces systèmes présentent l'avantage d'augmenter considérablement les potentiels énergétiques à exploiter. C'est le cas du Wavedragon, issu d'un projet européen et qui est encore au stade de prototype. Cette centrale a été conçue pour être opérationnelle en pleine mer, à une vingtaine de kilomètres des côtes. Elle est constituée d'une plateforme flottante, dont la partie centrale est surélevée par rapport au niveau moyen de l'eau. Lors de fortes vagues, l'eau est projetée sur la plateforme. Elle s'écoule ensuite le long de siphons traversant la plateforme et actionne, ici aussi, des turbines



génératrices d'électricité. L'électricité produite est ensuite transférée à terre par un câble sous-marin long de plusieurs dizaines de kilomètres. Des variantes du Wavedragon, présentant des formes et des dimensions variées, sont développées actuellement et pourraient présenter des rendements optimaux dès les prochaines années.

La centrale houlomotrice ondulante Pelamis, développée en Écosse, est un système flottant de 120 mètres de long et qui pèse 750 tonnes. Le Pelamis est composé de quatre cylindres reliés par des articulations mobiles. Son groupe convertisseur d'énergie est constitué de vérins hydrauliques reliant deux à deux chacune de ses articulations. Le mouvement périodique des vagues entraîne l'ondulation du Pelamis. Les vérins se contractent à chaque mouvement et envoient alors du fluide à haute pression vers les convertisseurs. L'électricité est générée, puis transférée à terre par un câble conducteur sous-marin. Les rendements de la centrale Pelamis sont tout à fait performants puisqu'elle produit actuellement une moyenne de l'ordre de 800 kilowatts par heure, ce qui correspond à la consommation effective de 500 foyers d'habitation. De plus, le Pelamis est une structure presque totalement immergée qui occasionne peu de gêne visuelle. Depuis quelques années, de nouveaux modèles de centrales houlomotrices ont été élaborés. Ces centrales sont équipées de convertisseurs à flotteurs. La centrale Oweco est constituée de l'assemblage de dizaines de ces convertisseurs à flotteurs liés à un socle dérivant à quelques mètres de profondeur sous la surface des eaux marines. Le système convertisseur d'énergie est simple. Chaque flotteur est soumis au mouvement des vagues en surface, et est relié par un tube coulissant dans un cylindre au socle de la centrale. Le socle restant à profondeur constante, le flotteur étire puis contracte le tube coulissant, qui agit comme un vérin et est couplé à un système produisant l'électricité. La transmission d'énergie électrique vers la terre se fait à encore par câble. La centrale Oweco est encore en développement mais montre déjà des rendements susceptibles d'élargir son utilisation à grande échelle.

L'ÉNERGIE DES COURANTS MARINS

La troisième catégorie de filières énergétiques se rapporte à l'exploitation d'énergie des courants marins. Les courants correspondent à des déplacements continus d'eau qui sillonnent les océans sur des milliers de kilomètres, avec des vitesses approchant parfois plusieurs mètres par seconde. Il existe deux grands types de courants. Les courants de surface sont générés par les vents et circulent à la surface des océans. Les courants de profondeur, eux, progressent sur les fonds. Leur existence est une conséquence des variations thermiques

des eaux océaniques. La somme d'énergie mécanique et thermique véhiculée par les courants marins est considérable. On estime ainsi que l'énergie totale consommée par l'humanité est comprise entre 1 et 2 % à peine de l'énergie thermique véhiculée par le Gulf Stream, courant marin de l'Atlantique. L'exploitation à grande échelle de l'énergie des courants de surface, la seule qui soit aisément accessible, apparaît donc depuis longtemps comme potentiellement intéressante. Les tentatives d'exploitation sont anciennes et, là encore, les difficultés rencontrées ont été nombreuses. Les projets actuellement développés sont pour la plupart en voie d'expérimentation. Les capteurs d'énergie qui semblent les mieux adaptés aux caractéristiques dynamiques des courants marins sont les hydroliennes, l'équivalent marin des éoliennes. Les hydroliennes sont fixées



aux fonds marins, ou peuvent être surélevées en étant fixées à des mâts de suspension. Elles sont de formes et de dimensions variées, certaines fonctionnant avec des rotors axiaux, d'autres avec des rotors équatoriaux. La densité de l'eau de mer étant 800 fois plus élevée que celle du vent, à dimension égale une hydrolienne produit beaucoup plus d'énergie qu'une éolienne. Les hydroliennes ont donc des dimensions moins importantes, ce qui simplifie leur entretien. Depuis quelques années, plusieurs pays se sont lancés dans des projets d'exploitation d'énergie des courants par hydroliennes. Les résultats obtenus sont encore insuffisants mais tendent à montrer que ces systèmes, une fois optimisés, pourraient devenir assez performants pour une utilisation rentable à grande échelle. Les hydroliennes présentent plusieurs avantages. Tout d'abord, les courants étant constants en direction et en intensité, elles peuvent être fixées de façon définitive dans une configuration telle que le capteur d'énergie soit le plus exposé aux courants et présente donc toujours des rendements optimaux. De plus, ces systèmes complètement immergés n'entraînent pas ou peu de gêne pour les trafics maritimes. Par contre, les conditions d'usure dans un tel milieu de forts courants d'eau et de pressions importantes devront être prises en compte pour confirmer la rentabilité à long terme des hydroliennes. Enfin, il existe quelques modèles de centrales développés actuellement et dont le système convertisseur d'énergie ne repose pas sur le principe de l'hydrolienne. Ils sont peu nombreux, mais parmi eux, certains sont performants. C'est le cas des systèmes fonctionnant d'après le principe de l'aile battante. Il s'agit d'un appareil comprenant un cadre fixe supportant un bras mobile en forme de queue de baleine. Le bras oscille sous l'influence

du courant. Ces battements mécaniques sont transformés en énergie électrique au niveau de vérins fixés entre les montants rigides et le bras mobile.

LES PERSPECTIVES

DES FILIÈRES D'AVENIR

L'élaboration, puis l'expérimentation de diverses technologies d'exploitation des énergies de la mer ont montré que certaines d'entre elles présentent des potentialités particulièrement intéressantes. Parmi celles-ci, on peut citer la centrale ondulante Pelamis. Le Portugal est en train de se doter de trois de ces appareils, dont la mise en activité au large d'Aguçadoura, au Nord du pays, est prévue pour les prochaines années. L'exploitation des machines devrait satisfaire les besoins en électricité de plus de 1 500 foyers. Dans les années suivantes, il est déjà prévu d'installer une centaine de machines, qui pourraient alors produire une puissance globale de l'ordre de 500 MW. Ceci rendrait le projet rentable et ferait du Portugal le premier producteur mondial d'électricité produite à partir des vagues. Pour ce qui concerne l'exploitation de l'énergie des courants marins, plusieurs projets ambitieux sont aussi élaborés. En France, par exemple, un projet d'installation d'un réseau d'hydroliennes est en cours de développement. Les côtes françaises disposent d'un potentiel énergétique de courant marin s'élevant à près de 6 GW (6.10⁹ watts), dont l'exploitation permettrait de couvrir environ 5 % de la production électrique française actuelle. Pour atteindre cette capacité de puissance, équivalente à celle de deux à trois centrales nucléaires, il faudrait alors installer un rideau de 4 500 hydroliennes en fond de mer. Un tel rideau d'hélices aurait une longueur de près de 21 km et serait disséminé à moins de 6 km des côtes, entre les îles de Sein et Ouessant. Totalement immergé, il ne devrait pas induire de gêne à la navigation. De tels projets ne paraissent pas irréalisables et semblent surtout dépendre de financements

indispensables à leur réalisation. La compétitivité de ces énergies devra donc être démontrée dans le futur, et les promoteurs industriels devront avoir la garantie de retours assez rapides des lourds investissements nécessaires. Suivant le protocole de Kyoto, régissant la gouvernance internationale sur le climat, la France s'est engagée à produire 21 % de son énergie sous forme renouvelable d'ici 2010. L'exploitation des énergies de la mer pourrait trouver là une voie d'investissements importante l'amenant à devenir une source majeure pour les énergies du futur.

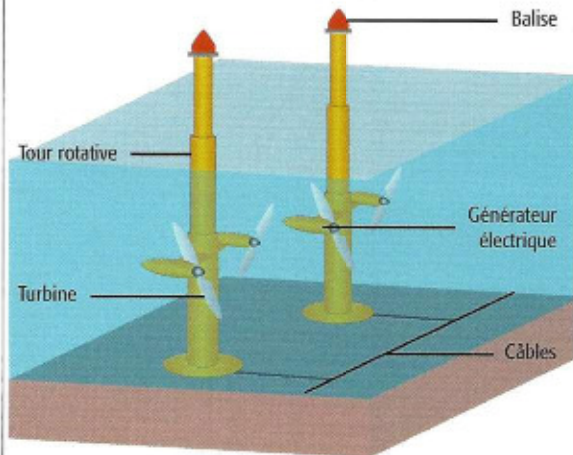
LA DIVERSIFICATION DES FILIÈRES

Les filières énergétiques exploitant les phénomènes dynamiques des océans ne sont pas les seules pouvant présenter des rendements intéressants. On peut citer la filière d'utilisation de l'énergie thermique des mers, appelée ETM. Elle repose sur l'exploitation de l'énergie qui s'échange entre les eaux froides des profondeurs et les eaux plus chaudes de surface. Cette énergie thermique des mers est déjà utilisée, notamment dans les zones intertropicales où ces différences de température sont importantes. Elle sert, entre autres, à la climatisation de certains hôtels ou édifices publics mais pourrait trouver des champs d'application plus vastes. Une autre voie d'exploitation des énergies de la mer se rapporte aux énergies d'origines biologiques et surtout algales. Les



algues sont des microorganismes qui présentent des taux de croissance très importants. Elles synthétisent des composés hautement énergétiques, comme certains corps gras. Leur mise en culture intensive pour l'obtention de quantités industrielles de ces composés pourrait être à l'origine de nouvelles filières énergétiques rentables.

Fonctionnement d'une hydrolienne



Les turbines entrent en rotation sous l'effet des courants marins. Associées à un générateur, elles créent alors de l'énergie électrique qui est acheminée jusqu'au rivage par les câbles.