

Lucas DEIS
Samuel GERMAIN
Nina LECLERCQ
Antoine MILLE
Gustave ROBERT
Philomène VERGNOL



Projet de P6 :

Les énergies marines renouvelables



Table des matières

I. Point historique.....	3
II. Enjeux.....	4
III. Contexte actuel.....	5
IV. Les différentes énergies marines renouvelables.....	8
1. L'énergie hydrolienne.....	8
2. L'énergie marémotrice.....	16
3. L'énergie houlomotrice.....	21
4. L'énergie thermique des mers.....	28
5. L'énergie osmotique.....	33
V. Comparaison des différentes énergies.....	37
VI. La place des énergies marines renouvelables dans la politique.....	38
Conclusion.....	41
Bibliographie.....	43

I. Point historique

L'évolution des sociétés humaines à travers le temps a souvent été liée aux différentes révolutions énergétiques qui ont jalonné notre histoire. En effet, l'Homme a connu l'âge de pierre au début de la préhistoire, période comprenant l'apparition de l'humanité, puis l'âge du feu, source d'énergie incontournable pour l'éloignement des prédateurs, la cuisson des aliments ou encore la lutte contre le froid. Puis il y eut l'âge du bronze de 3 000 ans à 1 000 ans av. J.-C., l'âge du fer qui débute à différentes périodes selon les zones géographiques et se termine au cours du 1^{er} siècle av. J.-C., tous deux étant caractérisés par l'usage de la métallurgie du bronze et du fer. Ces différentes périodes, qui ont contribué à l'essor de l'humanité, appartiennent à la préhistoire. S'ensuit alors les différentes révolutions industrielles, périodes historiques cette fois, allant du 18^{ème} au 20^{ème} siècle, notamment la première révolution industrielle, marquée par l'invention de la machine à vapeur par Thomas Newcomen en 1712, et l'exploitation du charbon ou encore la deuxième révolution industrielle, basée sur les premières utilisations du pétrole et de l'électricité. Le charbon, le pétrole, le gaz naturel, tous représentent des énergies sans avenir, non renouvelables, dites « fossiles », qu'il va falloir remplacer en développant de nouvelles méthodes de production d'énergies renouvelables.

On connaît aujourd'hui l'énergie utilisant la force du vent, produite par l'intermédiaire d'éoliennes, ou encore l'énergie photovoltaïque, grâce aux panneaux solaires qui captent l'énergie du soleil, afin de la convertir en électricité. Or on remarque parfois que, au vu des différentes implantations d'éoliennes ou de centrales solaires photovoltaïques sur la surface du globe, que celles-ci résultent parfois d'un manque de logique. Il s'agit là d'évoquer le problème de l'éolien, dans le Nord de l'Europe et en Allemagne notamment, où l'on observe de multiples éoliennes produisant de grandes quantités d'électricité, alors que la demande en électricité est beaucoup plus forte dans le Sud. Si l'éolien est le moyen le plus efficace pour produire de l'électricité dans cette zone géographique par exemple, il n'en demeure pas moins que cela implique la création d'un réseau de transport d'électricité, avec une densification et un maillage de lignes électriques à 400.000 volts. Ainsi, dans ce cas précis, cela revient à une empreinte écologique sur terre toute aussi importante que d'installer des éoliennes dans le Nord, alors qu'il s'agit plutôt de la préserver et de produire de l'énergie sans polluer. Il en va de même concernant l'installation de panneaux photovoltaïques dans les régions du Nord de l'Europe, qui n'ont pas de sens puisqu'ils sont moins exposés aux rayons solaires que dans les régions du Sud.

Mais il existe également d'autres énergies renouvelables, pour la plupart méconnues du grand public, encore sous-estimées, et encore au stade de développement. Parmi elles, les énergies marines renouvelables (EMR), apparues au cours du 20^{ème} siècle, et qui se développent à travers différentes sources d'énergie d'origine océanographique : l'énergie osmotique, houlomotrice, hydrolienne, l'énergie thermique marine, et enfin l'énergie marémotrice. L'objet de ce rapport est d'évoquer toutes ces énergies marines renouvelables, leurs avantages et inconvénients, leur stade de développement actuel dans un but de déterminer si ces énergies peuvent représenter de nouvelles sources d'énergie afin de répondre aux futurs besoins énergétiques de notre pays.

II. Enjeux

Les enjeux des énergies marines renouvelables sont considérables, et bien souvent, sous-estimés. Comme on a pu le constater, la question autour de ces énergies renouvelables et plus généralement de la transition énergétique n'est plus au cœur des débats politiques et passe parfois inaperçue. Pourtant, la pression pour assurer la transition énergétique, impliquant la production et la distribution d'énergie n'est pas négligeable. C'est pourquoi, les énergies marines renouvelables viennent s'inscrire parfaitement dans un contexte global où il est nécessaire de moins polluer (GES) et consommer moins d'énergie.

Durant de très nombreuses années, et notamment en France, les énergies des mers ont été le plus souvent oubliées des budgets de Recherche & Développement (R&D), elles représentaient 0,1 % sur les 8 % du budget total de la recherche publique, consacré aux énergies renouvelables (période 1987 – 2001).¹

La part actuelle dans la production électrique mondiale n'est que de 0,15 % pour les énergies marines renouvelables. Mais celle-ci est appelée à augmenter considérablement puisque ces énergies sont amenées à se développer dans le mix énergétique sur tous les continents. En témoignent les 130 milliards d'euros de projets recensés dans la filière ces vingt prochaines années par Patrick de la Morinerie.²

Selon Manicore, en 2008, « le potentiel de ces énergies souffre de contraintes de localisation et (pour l'éolien offshore) d'un caractère aléatoire et intermittent. Dans les années 2010, des éoliennes flottantes apparaissent et des moyens nouveaux de récupérer l'énergie de la houle sont envisagés ou testés ».

La recherche et développement des énergies marines renouvelables se poursuit également bien au-delà de nos frontières. Au Japon notamment, où l'on retrouve une centrale offshore représentant un coût de 13 milliards de yens, soit 121M d'euros, qui visent à tester plusieurs formes d'énergie marine (énergie marémotrice, houlomotrice et exploitant le différentiel de température entre surface et profondeur). En Europe également, où le Conseil européen a validé depuis décembre 2008, le paquet énergie/changement climatique favorisant la R&D en matière d'énergies marines, via notamment un centre Européen pour les énergies marines.

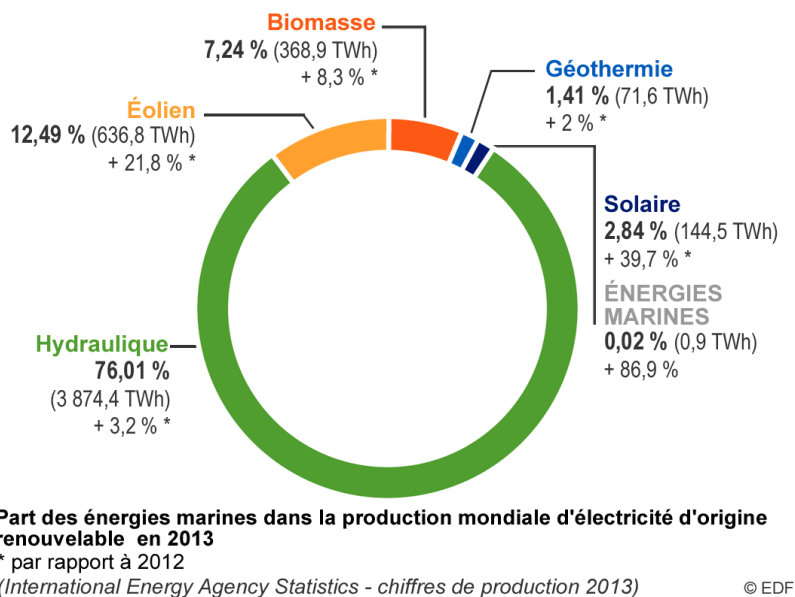
C'est pourquoi l'avenir du mix énergétique mondial suppose une meilleure exploitation des ressources maritimes.

¹Source : https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_marine

²Source : http://www.lantenne.com/Les-EMR-un-marche-a-fort-potentiel_a18202.html

III. Contexte actuel

En 2013, la production mondiale d'électricité s'élève à 23 405,7 TWh. Elle est en majorité issue de la thermique à flamme. Le principe de ce type de production d'énergie est la combustion d'un gaz, de fioul ou de charbon, dont la chaleur dégagée est utilisée pour créer de la vapeur d'eau sous haute pression, et de là, qui actionne une turbine produisant de l'électricité. La répartition ci-dessous de l'origine de l'énergie mondiale peut s'expliquer par le développement industriel de pays comme la Chine disposant d'importantes réserves en charbon. Les énergies renouvelables constituent donc une part moindre de l'énergie électrique créée à l'échelle mondiale.

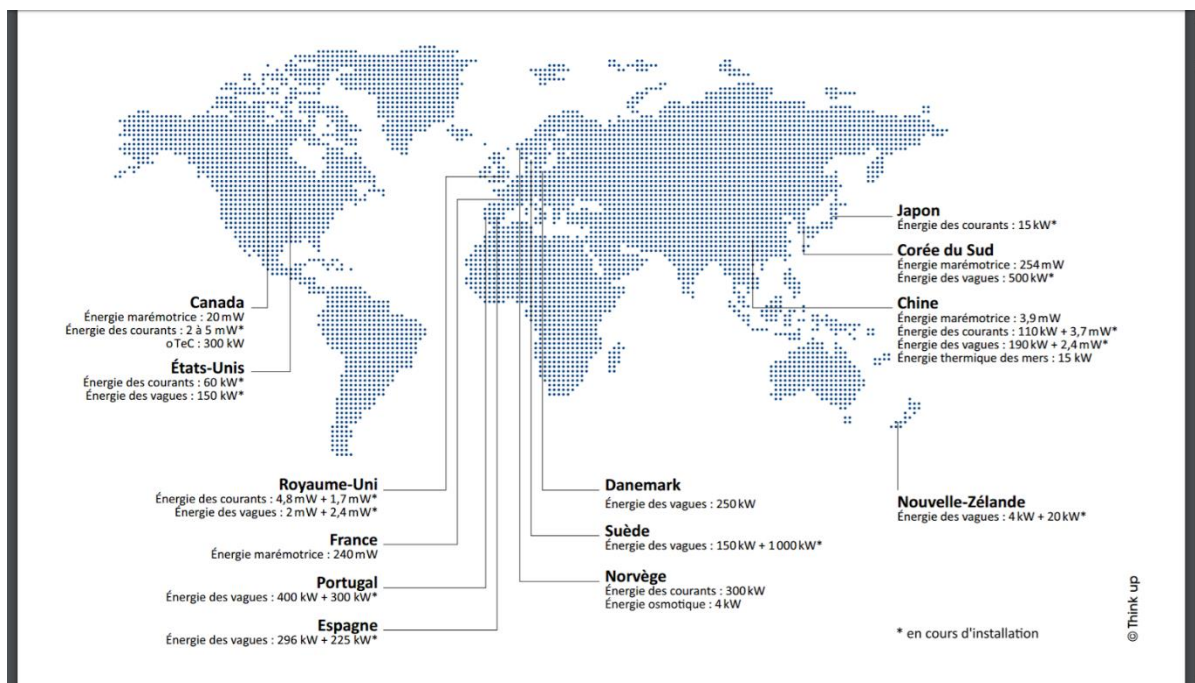


On remarque que le secteur marin est pour l'instant le moins développé des énergies renouvelables.

À ce jour, les seules énergies marines dont la technologie est exploitée au niveau industriel sont l'éolien offshore et les usines marémotrices. Dans le monde on compte sept usines marémotrices au stade d'exploitation qui fournissent à elles toutes 522 MW (94% de cette énergie est produite par les usines de la Rance et de Sihwa en Corée du Sud), une dizaine au stade d'étude ou de construction. La France a été pionnière dans le domaine de l'énergie marémotrice grâce à l'usine de La Rance, mise en service en 1969. A ce jour, elle produit 240 MW, une quantité d'énergie permettant d'alimenter une ville de la taille de Rennes, soit 4% de l'électricité consommée en Bretagne. En 2011, la plus grande usine marémotrice est mise en service avec une puissance de 254 MW. C'est la centrale de Sihwa située en Corée du Sud.

La puissance énergétique marémotrice arrive loin derrière celle de l'éolien offshore, qui produit quant à elle 12 GW à l'échelle mondiale en 2015. Les pays les plus avancés dans ce domaine sont dans l'ordre décroissant le Royaume-Uni, l'Allemagne, le Danemark, la Chine et la Belgique. Une trentaine de projets d'exploitation d'hydroliennes sont actuellement testés dans le monde, notamment au Royaume-Uni, en Norvège, en Irlande du Nord et aux États-Unis.

Voici un état des lieux des énergies marines en 2011, capacité installée à travers le Monde.



En 2012, figurait parmi les 60 engagements pour la France de François Hollande : « Je ferai de notre pays le leader européen des énergies marines renouvelables ». Quatre ans plus tard, on en est encore loin. La France a un potentiel remarquable grâce à son domaine marin impressionnant (11 millions de km² d'eaux sous sa juridiction en comptant la métropole et l'Outre-mer), qui est le deuxième meilleur du monde, celui des États-Unis étant le premier. Malgré ce potentiel, la France a pris du retard dans cette filière prometteuse : Pour l'instant, le seul site français de grande envergure produisant de l'électricité à l'aide des énergies marines renouvelables est encore l'usine marémotrice de la Rance évoqué un peu plus tôt. Le parc hydropilote de Paimpol-Bréhat, situé au large des Côtes-d'Armor, devrait être mis en service d'ici 2017 et produire 1 MW d'électricité en continu grâce à deux hydroliennes. On projette d'y installer une centaine d'hydroliennes si les hydroliennes actuelles ne posent pas de problème.

En 2011 et 2013, l'état français lance deux appels d'offres relatifs à l'éolien offshore pour une capacité totale de 3000 MW pour chacun des appels d'offres. Au total, six parcs éoliens seront construits au large des côtes normandes, bretonnes et vendéennes entre 2017 et 2020 pour le premier appel d'offres, puis entre 2020 et 2023 pour le deuxième appel d'offres. Un troisième appel d'offres est lancé en avril 2016, toujours relatif à l'éolien offshore.

Exception faite des usines marémotrices, l'éolien en mer posé (dont les mâts sont fixés sur le fond marin, en eau peu profonde) est la seule technologie aujourd'hui exploitée au niveau industriel dans le monde. Ségolène Royal, actuelle ministre de l'écologie, a mis en place en 2015 une série d'appel d'offres relatifs aux EMR dans le cadre de la transition énergétique. Dix dossiers

ont été retenus et bénéficieront au total de 4 millions d'euros d'aide au développement. Voici quelques exemples de titres de projets retenus : modélisation et observation des états de mer extrêmes, suivi en service des systèmes d'ancrage pour les EMR, stabilité des câbles et hydrodynamique de fond, une solution viable au problème de l'éolien off-shore flottant, etc...

Fin 2016, la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique est de 16% ce qui en fait le 16ème pays de l'union européenne le plus avancé dans la transition énergétique, et le place en dessous de la moyenne des 28 pays de l'union. La France s'était pourtant fixé comme objectif de 23% d'énergies renouvelables dans le mix énergétique dans le cadre du "paquet énergie-climat" européen. En 2015, le Parlement adopte une loi promulguant l'objectif ambitieux d'arriver à une part de 32% de consommation d'énergies renouvelables d'ici 2030. Afin d'atteindre ces objectifs, la loi comporte des mesures telles que "l'autorisation unique pour la mise en service d'installations éoliennes et hydroélectriques".

IV. Les différentes énergies marines renouvelables

1. L'énergie hydrolienne

Qu'est-ce qu'une hydrolienne ? C'est un dispositif sous-marin qui cherche à capter l'énergie cinétique de l'eau et des courants marins et de la transformer en électricité. En pratique, le dispositif et le fonctionnement peuvent être aisément comparés à ceux d'une éolienne, qui cherche à capter l'énergie cinétique du vent.

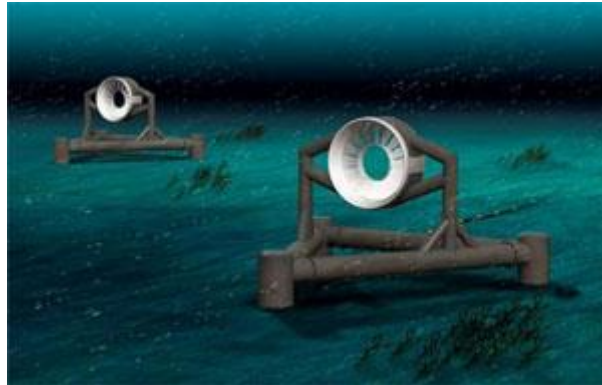


Fig 1 : Projet d'hydrolienne (DCNS)

L'hydrolienne comporte soit une hélice constituée de pales, soit une roue à aubes reliée directement à un arbre qui, lorsqu'il est mis en rotation par les courants marins, entraîne une génératrice électrique ou un alternateur. Plusieurs projets d'hydrolienne sont en cours d'étude ou de réalisation. Le principe est toujours le même : tout comme l'éolienne, la plupart des projets cherchent à entraîner des hélices, des turbines ou des pales de grand diamètre (compris entre 10 et 20 m,) à l'aide du passage de courants marins.

On peut aussi comparer le fonctionnement d'une hélice d'hydrolienne à celui d'une hélice d'avion. Cependant, on remarque que dans le second cas, c'est l'hélice qui, entraînée par le moteur, génère un mouvement cinétique de l'air. Pour l'hydrolienne ou même l'éolienne, c'est l'énergie cinétique du fluide (eau ou vent) qui entraîne l'hélice et un générateur dans un mouvement de rotation. En effet, le profilage de chacune des pales permet d'un côté une surpression (en rouge qui pousse la pale et de l'autre côté une dépression (en bleu) qui aspire l'hélice (voir la figure ci-dessous).

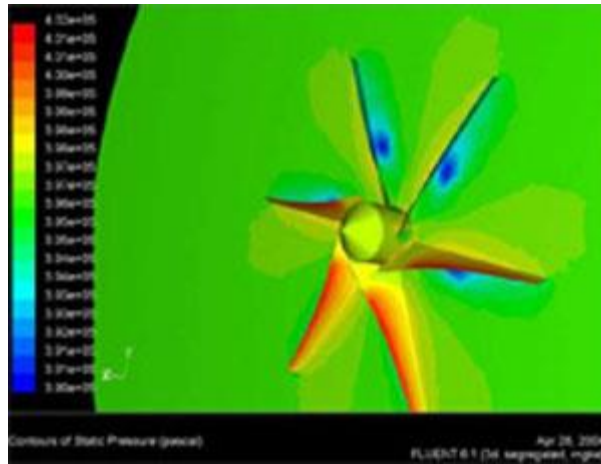


Fig 2 : Fonctionnement d'une hélice

Actuellement, les dispositifs hydroliens sont pour la grande majorité soit fixés à un mât qui lui-même est ancré au sol (fonds marins) soit intégrés dans un bâti qui repose au sol à l'aide de trois pieds. La présence d'un mât qui monte jusqu'à la surface facilite la mise en place et surtout la maintenance de l'hydrolienne puisque ces opérations peuvent être accomplies hors de l'eau. Ce n'est pas le cas des dispositifs tripodes qui eux doivent être maintenus sous l'eau ou être entièrement remonté à la surface.

Intéressons-nous tout d'abord au modèle classique à hélice ; la puissance que génère une hydrolienne est une puissance cinétique dont l'expression est : $P_{cin} = \frac{1}{2} \rho S \cdot V^3$

ρ : masse volumique du fluide (1025 kg.m⁻³ pour l'eau de mer)

V : vitesse du fluide (en m/s)

S : surface traversée par le fluide en écoulement (en m²)

Puisque l'eau est un fluide incompressible, le produit de la vitesse V par la section S doit être constant. C'est pourquoi, devant l'hydrolienne, le fluide est ralenti par « la présence d'un obstacle » un peu plus loin et ainsi la section de l'eau en écoulement s'élargit. Au niveau des hélices, le changement de section est négligeable, puisque qu'on considère que la profondeur de l'hydrolienne est très petite comparée à son diamètre, la vitesse du fluide est donc constante. Enfin, après les hélices, le fluide est encore ralenti et la section s'agrandit encore. Pour résumer, lorsque le fluide en écoulement n'est pas canalisé, une partie de celui ne passe pas au travers du disque que représente l'hydrolienne mais il contourne « l'obstacle ». Ce qui entraîne des pertes estimées à 41% de l'énergie cinétique¹, c'est le phénomène de la limite de Betz. Cependant, la masse volumique de l'eau étant 832 fois plus élevée que celle de l'air (1025 kg.m⁻³ pour l'eau salée à 15°C contre 1,23 kg.m⁻³ seulement pour l'air à la même température). Ainsi, malgré des vitesses bien moins importantes pour l'eau (de l'ordre de 1 à 2 m/s) que pour le vent, la puissance récupérable par une même surface est beaucoup plus grande pour une hydrolienne que pour une éolienne. Enfin, des pertes engendrées par le frottement des pièces de la machine ainsi qu'à la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique font chuter le rendement de l'hydrolienne à des pourcentages avoisinant les 50%. Cependant, une hydrolienne reste tout de même bien plus efficace qu'une éolienne, en effet, un courant marin de 2,5 m/s permet à une hydrolienne de 20m de diamètre de

¹<https://fr.wikipedia.org/wiki/Hydrolienne>

produire 1 MW, alors qu'une éolienne de 80m de diamètre ne produit pas plus de 2 MW (vent de 10 m/s).

Historiquement, le développement de l'énergie hydrolienne est très récent. Les premiers projets ont été initiés au début du XXIème siècle seulement. En effet, la prise de conscience de la nécessité de remplacer les énergies fossiles très polluantes, a été très tardive. De plus, le milieu marin est particulièrement agressif puisqu'il est favorable à la corrosion due au sel ainsi qu'au développement d'organismes dits « encroûtant » tels que les algues, coquillages, etc., Cependant, depuis 5 à 10 ans, avec les progrès techniques considérables en termes de matériau permettant l'aboutissement et les résultats des premières installations hydroliennes, le nombre de projets dans le monde a explosé passant de 5 en 2003 à plus de 80 en 2016. Mais aujourd'hui, seules une quinzaine d'hydroliennes produisent de l'électricité dans le monde et ce, dans des parcs d'essais en Ecosse, au Pays-Bas, au Canada et au Japon.



Fig 3 : Hydrolienne fonctionnelle dans la baie de Fundy

Les avantages que présentent les hydroliennes à hélices sont les suivant :

- Elles sont beaucoup plus petites que les éoliennes pour une même puissance puisque la masse volumique de l'eau est largement supérieure à celle de l'air.
- Le potentiel des courants marins en Europe est estimé à environ 12,5 GW et la France représente à elle seule près de 2,5 GW selon les estimations d'EDF ce qui équivaut à 2 ou 3 réacteurs nucléaires.
- Le caractère prévisible des courants marins. Il est possible d'estimer précisément la production possible des hydroliennes sur plusieurs années, une aubaine lorsque l'on s'aperçoit que de nombreuses éoliennes restent immobiles parfois pendant plusieurs semaines faute de vent.
- Une fois en fonctionnement, l'hydrolienne ne rejette ni CO₂ ni déchets radioactifs ce qui fait d'elle une énergie très propre et surtout renouvelable. De plus, de nombreuses études ont été menées au cours de ces 10 dernières années dans le but de réduire voire même supprimer la gêne que les hydroliennes pourraient occasionner sur la faune et la flore marine. Ainsi, les hélices

tournent en général à des vitesses comprises entre 10 et 15 tours par minutes, 10 fois moins rapide que des hélices de bateau.

- Situées en pleine mer, les hydroliennes ne gênent aucun habitat et ne gâchent pas le paysage.

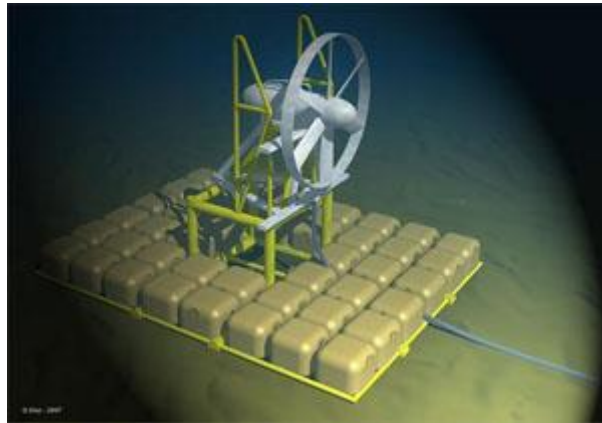


Fig 4 : Projet Sabella

Cependant, l'énergie hydrolienne présente elle aussi des inconvénients comme :

- La création de zones de turbulence qui modifie la sédimentation et les courants marins ce qui peut avoir des effets sur la faune et la flore aval à la turbine. Ces zones sont malgré tout à double tranchant car elles permettent aussi d'éviter l'ensablement des fonds marins à proximité.
- L'immersion totale des hydroliennes sur de très longues périodes les rendent très vulnérables. En effet, l'érosion des pales par le sable est très forte. De plus, le développement rapide d'algues et d'organismes encroûtant sur l'hydrolienne impose l'utilisation de produits dits « antifouling » (peinture contenant des biocides destinés à empêcher les organismes aquatiques de se fixer) pour la plupart toxiques pour l'environnement. Ces problèmes sont d'autant plus importants que la maintenance des machines sous l'eau est quasiment impossible. C'est pourquoi, il est nécessaire de prévoir des dispositifs tels que des mâts, plateformes et treuils permettant aux hydroliennes d'être sorties de l'eau facilement pour les opérations de maintenance.

Aujourd'hui, de nombreux projets en France et dans le monde sont en cours. Malheureusement, bon nombre d'entre eux ont été abandonnés, en raison du manque de résultats probants ou d'argent. Ainsi, le parc d'Engie qui devait voir le jour en Normandie a dû être stoppé suite à l'abandon du fournisseur General Electric, qui abandonne le développement des turbines hydroliennes faute de perspectives d'avenir. Il y a pourtant bonnes raisons de croire en une explosion du nombre d'hydroliennes mises en service en France, étant donné le grand potentiel énergétique des fonds marins français.

Dernièrement, Open Hydro (groupe de construction navale DCNS) a développé des hydroliennes totalement immergées ; posées aux fonds marins à l'aide d'un socle. L'industriel a déjà fait tourner deux hydroliennes dans un parc d'essai au large de Paimpol-Bréhat. Cependant, les deux hydroliennes de 16 m de diamètre pour une puissance cumulée de 1MW ont dû retarder leur raccordement au réseau en raison d'un « défaut de qualité » contraignant DCNS à les sortir de l'eau. Ce raccordement est prévu pour fin 2017. Néanmoins, l'industriel qui emploie environ 150 personnes dans l'hydrolien veut continuer à croire en cette ressource puisqu'une première machine du même type fonctionne depuis novembre 2016 dans la baie de Fundy au Canada.



Fig 5 : Hydrolienne Open Hydro (DCNS)

De plus, ce même constructeur naval doit « entamer dans les prochaines semaines la construction d'une usine d'assemblage d'hydroliennes à Cherbourg » d'après le journal Sud-Ouest. Enfin, le 5 avril 2017, l'Etat français a autorisé la création de Normandie Hydro par DCNS et EDF, ce sera le premier parc hydrolien pilote en France, il sera situé au large de Cherbourg. Ce projet de 7 machines de 16 mètres de diamètre et 2MW (même modèle d'hydrolienne que Open Hydro, voir Fig 5) chacune situé à 3,5 kilomètres des côtes et près de 30 mètres de profondeur devrait permettre, d'ici 2019, de fournir suffisamment d'électricité pour alimenter une ville de 10 000 à 13 000 personnes a indiqué Thierry Kalanquin, PDG de DCNS Energies. C'est un parc pilote, ce qui signifie que son fonctionnement sera rigoureusement étudié et expérimenté en vue de commercialiser des fermes hydroliennes du même type à l'avenir. Pour l'instant par exemple, l'industriel n'est pas aujourd'hui en mesure de prévoir la fréquence, la durée et le coût des maintenances nécessaires par exemple.

D'autres PME sont aussi de la partie et notamment l'entreprise Sabella qui est la seule aujourd'hui en France à pouvoir se targuer de distribuer de l'électricité d'origine hydrolienne. Et pour cause, la PME a alimenté l'île bretonne d'Ouessant entre novembre 2015 et juin 2016. L'hydrolienne de l'île d'Ouessant pèse 7 tonnes et possède des pales de 3 mètres de diamètre pour une rotation de 20 tours par minutes environ (voir Fig 6). Cependant, son socle rudimentaire ne lui permet pas d'être installé partout. Pour cette raison également, l'entreprise a préféré sortir l'hydrolienne hors de l'eau lors des tempêtes hivernales, puisqu'il a été montré que la forte houle se ressentait jusqu'à 55 m de profondeur. L'hydrolienne devrait être reconnectée au réseau d'ici la fin de l'année 2017 et rester immergée pendant de plus longues périodes une fois les modifications apportées sur la solidité et la résistance à la corrosion de la machine.



Fig 6 : Hydrolienne Sabella

D'autres projets notables tels que ceux de la start-up grenobloise HydroQuest utilisent la technologie hydrolienne dans le but de créer des « fermes fluviales ». Ces machines à axe de rotation vertical sont cependant à plus petite échelle et produiront 40 kW chacune.

A l'échelle de la planète, le Canada et le Royaume-Uni mènent les débats. En effet, dans la baie de Fundy (voir Fig 3) notamment au sud-est du Canada, plusieurs hydroliennes et prototypes ont déjà été testés et installés. En Europe, le Royaume-Uni est le pays le plus en pointe. Le gouvernement britannique affiche ainsi une volonté de satisfaire 15 à 20% de ses besoins en électricité à partir d'énergies marines renouvelables. Ainsi, la compagnie TidalStream a mis au point un système d'hydrolienne depuis une dizaine d'années. La turbine semi submersible comporte 4 turbines montée sur une bouée tubulaire verticale et amarrée aux fonds marins par un bras pivotant (voir Fig 7). Ce système permet aux turbines de s'orienter face aux courants mais aussi facilite leur maintenance hors de l'eau.

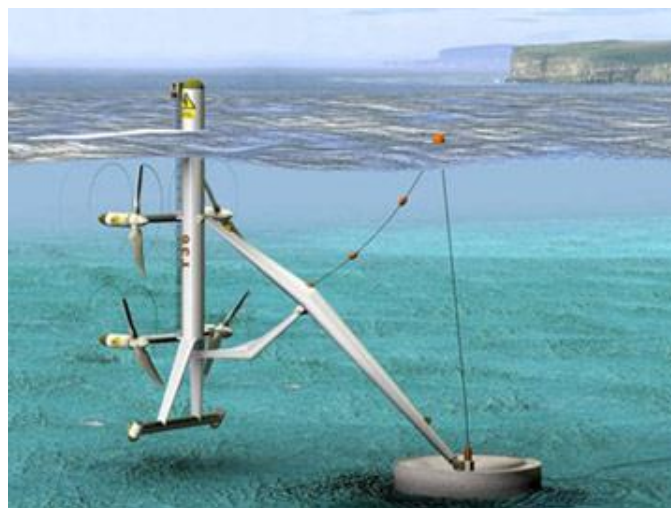


Fig 7 : Hydrolienne HydroQuest

Il faut par ailleurs bien prendre conscience que la recherche progresse à pas de géant depuis les années 2000 notamment, on voit apparaître des solutions techniques et technologiques alternatives

pour utiliser l'énergie des courants marins ; plus particulièrement celle de la membrane ondulante (voir la figure ci-dessus). Développée en France par EEL Energy, la membrane ondule sous l'effet de pression du fluide en mouvement et ces déformations de la structure sont ensuite transformées par un système électromécanique en électricité.



Fig 8 : Projet de membrane ondulante EEL Energy

Tout comme une manche à air, la membrane pourrait s'orienter d'elle-même au gré du courant et capter 100% de l'énergie cinétique puisque la limite de Betz ne s'applique pas et ne limite pas la récupération d'énergie (ici, le fluide n'est plus contraint à traverser un cylindre). Avec la membrane en effet, la section du fluide ne s'élargit pas avant le passage dans l'hydrolienne. Avec des dimensions avoisinant les 15 x 15 m avec le châssis et le socle et une production d'1 MW pour 2,5 m/s, ces prototypes seront moins encombrants et beaucoup plus modulables aux fonds marins, profondeurs d'eau et aussi courants marins. C'est un point essentiel que met en avant EEL Energy : les membranes ondulantes pourront fonctionner à faible vitesse de fluide (0,4 m/s) et s'adapter à la vitesse du courant. Ainsi, des études ont montré que les zones accessibles seront largement supérieures à celles des turbines classiques (voir Fig 9). Enfin, ce modèle présente l'avantage de n'engendrer aucune pollution sonore et semble pour l'instant, après plusieurs tests effectués par des prototypes en bassin, avoir un impact très limité sur la faune et la flore en comparaison aux modèles à hélices. Ce système est donc très prometteur pour l'avenir, mais demeure aujourd'hui au stade de prototype. L'incertitude reste forte quant à une commercialisation dans les prochaines années, car ce projet n'est qu'au stade d'essai prototype en bassin artificiel.

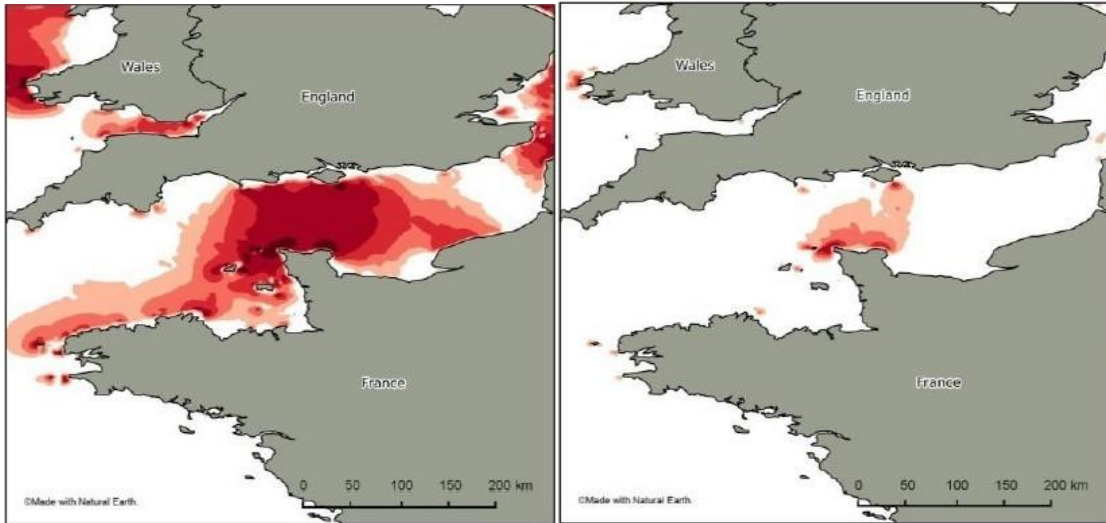


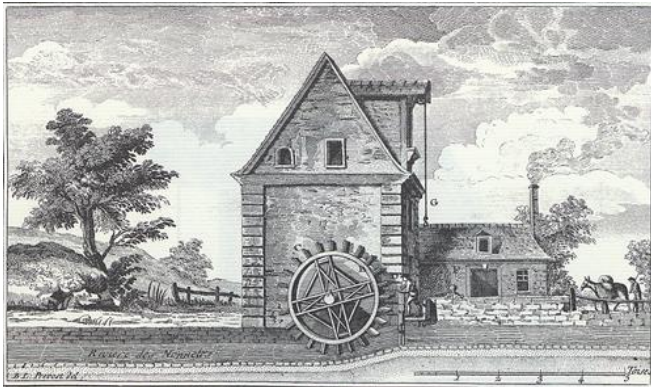
Fig 9 : Zone d'implantation potentielle de membranes ondulantes (à gauche) et zone d'implantation potentielle de turbines à hélices (à droite)

2. L'énergie marémotrice

L'énergie marémotrice consiste en l'exploitation de l'énergie issue des marées dans des zones littorales ayant une forte différence de hauteur entre les marées hautes et basses. On parle de forte différence de marnage. La marée est induite par les forces gravitationnelles de la Lune et du Soleil sur l'océan.

Au contraire des hydroliennes, les usines marémotrices n'utilisent pas l'énergie cinétique du courant des marées, mais l'énergie potentielle engendrée par la différence de marnage entre deux bassins séparés d'un barrage.

L'énergie marémotrice a une origine très ancienne. Cette énergie a tout d'abord été utilisée pour moudre des grains en farine, dans des moulins. Ces moulins étaient constitués d'une digue, des vannes et une roue extérieure ou intérieure entraînant des meules.



Bien que fixer une date exacte d'apparition des premiers moulins soit compliqué, ils auraient été connus du Monde Arabe vers l'an 1000. Ils se seraient développés, sur les côtes françaises de l'Atlantique et de la Manche au XIIe siècle. A cette époque, et jusqu'au XXe siècle, ces moulins ne fonctionnaient, sauf exception, qu'au simple effet de vidage.

Dans les années qui suivirent la Première Guerre Mondiale, la très forte hausse du prix du charbon ainsi qu'une importante augmentation de l'utilisation de l'électricité, a conduit à un intérêt grandissant de la France pour l'énergie marémotrice. Des études sont menées sur l'installation d'usines sur les côtes, notamment quelles embouchures seraient les plus aptes à accueillir des usines, dans les meilleures conditions. En 1925, un projet de construction est proposé au Congrès Houille Bleue, chargé de superviser les avancées sur l'énergie marémotrice, dans le but d'expérimenter les techniques de production en prévision de la mise en place de l'usine de la Rance. Toutefois, malgré les différentes études et projets, aucune réalisation concrète n'est construite.

C'est après la Seconde Guerre Mondiale que la recherche dans les énergies marémotrices reprend de plus belle. Plusieurs projets voient le jour mais seulement celui de l'usine de la Rance arrive à terme. Ce projet posait deux problèmes principaux, le ou les cycles de fonctionnement, ainsi que les caractéristiques des groupes immergés et leur protection contre la corrosion de l'eau de mer. Les démarches commencèrent en 1951, et les premiers chantiers furent ouverts début 1961, pour une mise en service le 4 décembre 1967.



Photo du chantier de construction de l'usine de la Rance

Après la construction de l'usine de la Rance, les études reprurent en 1980, dans le but d'aménager un grand ensemble marémoteur, en réduisant au maximum le coût, le coût de la production ainsi que les effets sur l'environnement. Ces recherches furent arrêtées en 1983, jugées pas assez prometteuses. À partir de ce jour, la France n'a pas repris de recherches, les connaissances de l'énergie marémotrice se résumant à l'expérience gagnée grâce à l'usine de la Rance.

Le phénomène de marée est induit par la rotation de la Terre sur elle-même (24h), responsable du rythme semi-diurne (2 marées par jour), ainsi que par les positions relatives de la Lune et du Soleil au cours de l'intervalle entre 2 nouvelles lunes consécutives. Ces différences de position conduisent à l'alternance entre grandes marées et mortes eaux.

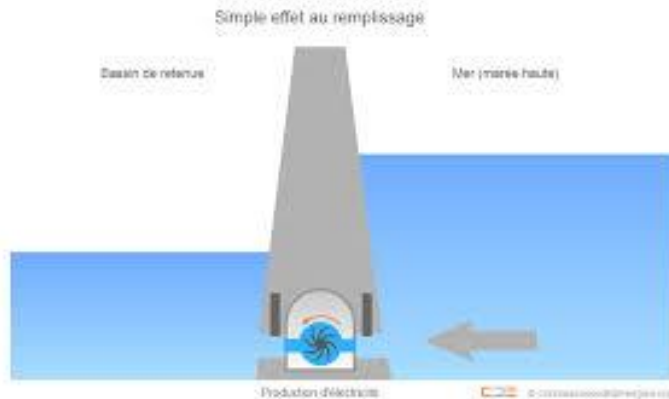
Une usine marémotrice utilise l'énergie potentielle des courants orchestrés par les marées. Pour cela, les usines doivent être positionnées dans des littoraux à fort marnage, idéalement entre 10 et 15 mètres.

Il existe 2 différents types d'infrastructures :

- Le simple bassin : Ce type d'ouvrage consiste à bloquer un important volume d'eau d'un bras de mer, grâce à un barrage. On ajoute alors des vannes au barrage, soit normales, soit dotées de turbines.

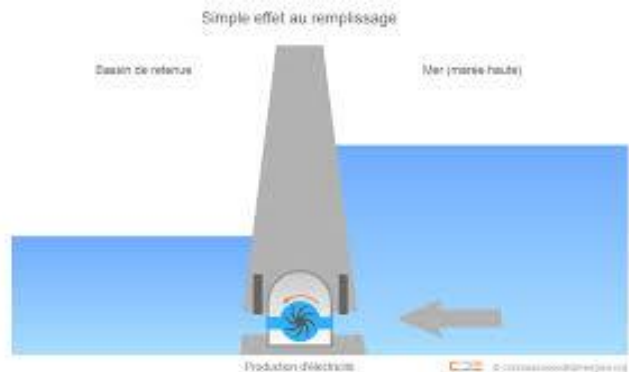
- Le double bassin : en plus du premier bassin formé par le premier barrage, on crée un bassin artificiel, situé plus bas que le niveau de la mer à marée basse, dont la délimitation est également un barrage doté de turbines. Ceci permet de produire de l'électricité à des moments voulus, comme pendant les jours à l'heure de pointe, ou alors en période de consommation plus faible. Le bassin supplémentaire sert à pouvoir exploiter la différence de marnage à n'importe quelle marée, comme une solution de stockage.

Il existe 3 manières différentes pour transformer l'énergie potentielle des marées en énergie électrique.

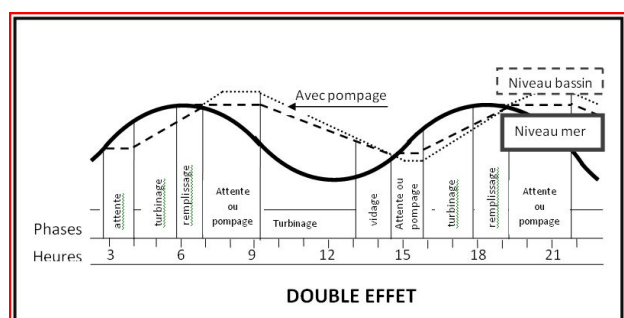
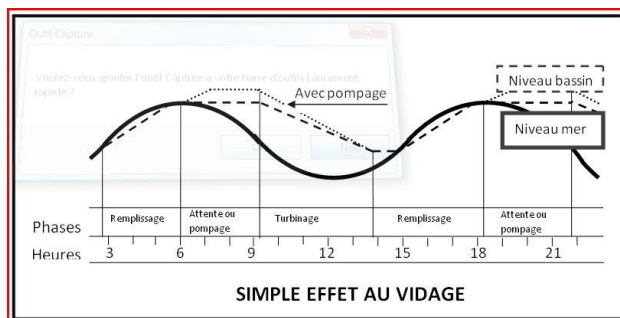


La première est le simple effet au vidage : A marée haute, les vannes du bassin sont fermées et celui-ci est alors rempli. Les vannes sont alors ouvertes lorsque la marée est redescendue, entraînant les turbines, qui grâce à un alternateur, produisent de l'électricité.

La seconde est le simple effet au remplissage : le bassin est fermé à marée basse afin d'avoir un marnage maximal. Lorsque la mer est au plus haut, on ouvre les vannes, laissant rentrer l'eau, entraînant les turbines.



Le double effet, enfin, consiste à faire fonctionner les turbines à la fois pendant le remplissage et pendant le vidage du bassin, afin de produire de l'électricité sur une plage horaire plus longue. La centrale de la Rance utilise ce fonctionnement. Il permet d'avoir une production d'électricité augmentée, et plus étalée.



Une fois l'électricité produite, grâce aux turbines, il faut encore amener celle-ci vers les lieux de consommation. Or, pour les énergies marines renouvelables, cela peut être un challenge scientifique et technique. Toutefois, une centrale étant un barrage rattaché à la côte, la distribution

de l'électricité dans les communes avoisinantes se fait de manière conventionnelle, sans problème particulier.

Le potentiel de l'énergie marémotrice à l'échelle mondiale représente près de 380 TWh (soit 160 GWh/an), c'est-à-dire 2 % de la production électrique mondiale annuelle. De plus, une centrale marémotrice peut être exploitée pendant plus de 100 ans, et à faibles coûts durant la période opérationnelle. Par exemple, la production d'électricité de l'usine de la Rance coûte 12 centimes par KW/h, soit un peu moins du double du coût de production des usines à énergie fossile. Enfin, ce type d'énergie est capable de fournir une production importante avec une fourniture d'énergie électrique fiable et prédictible.

En plus de cette production d'électricité, des usages supplémentaires peuvent être ajoutées à ces centrales, comme l'utilisation des bassins et du barrage pour de l'aquaculture, de nouvelles capacités portuaires ou routières, ou encore une protection des côtes contre l'érosion. Ce type d'exploitation serait viable pour une production sûre et à bas coûts, le tout dans un contexte de développement durable.

Par exemple, un projet au Royaume-Uni prévoyait la construction d'une centrale avec 90 turbines, totalisant une puissance pouvant aller de 1800 à 2600 MW. Elle aurait été capable d'alimenter 1,5 millions de foyers, mais il a été abandonné suite au coût trop élevé : 24 milliards d'euros, ainsi qu'à l'impact environnemental qu'aurait eu une telle construction.

Comme on peut le voir avec cet exemple, très peu de projets de nouvelles centrales voient le jour. En effet, les impacts environnementaux sont la plupart du temps jugés rédhibitoires, en particulier par une perturbation de l'écosystème durant la phase de travaux



Photographie du barrage de l'usine de la Rance

Autant l'exploitation d'une centrale marémotrice n'est que très peu polluante, car à part les actions de maintenance et de contrôle, il n'y a presque aucun rejet de matières ou gaz polluants, autant la construction a un impact très important sur l'environnement, que ce soit au niveau de l'écosystème, ou de la pollution de l'atmosphère, à cause de l'utilisation des machines de chantier.

En effet, les travaux nécessaires sont gigantesques, coûteux, de par le fait que la construction d'un barrage est nécessaire, sur une très grande distance, afin de fermer une baie. De

plus, afin d'aménager l'embouchure, il faut dévier le fleuve de la zone de travaux, grâce à des batardeaux, ce qui impose un travail pharaonique et d'une très grande ampleur.

Ces raisons expliquent pourquoi si peu de centrales marémotrices ont vu le jour, dans le monde entier.

3. L'énergie houlomotrice

L'énergie houlomotrice est l'énergie qui provient du mouvement de la houle, comme son nom l'indique. La houle est « un mouvement ondulatoire de la surface de la mer qui est formé par un champ de vent lointain. », selon Wikipédia. Il faut toutefois savoir que les vagues et la houle sont deux choses différentes : la houle se déplace sur de très longues distances (des milliers de kilomètres), et les vagues sur de courtes distances et restent donc locales.

Aujourd'hui, aucun projet n'a été assez concluant pour être finalisé et mis sur le marché pour le long terme. Toutefois, ce secteur se développe rapidement grâce à la recherche et les investissements des pays.

Le rendement est prévu entre 30 et 50% (contre 25% pour l'éolien terrestre et 40% pour l'éolien offshore) et le démarrage sur le marché à des coûts similaires aux hydroliennes.

Les inconvénients avec ce genre de systèmes sont tout d'abord que le prix de revient prévisionnel du MW/h d'électricité est difficile à estimer. En effet, le prix dépend du coût de production, d'installation, de maintenance, des investissements, etc. Comme les projets sont toujours en phase de recherche et développement et que ce secteur est très récent, il n'a pas encore été beaucoup étudié et donc les paramètres tels que le prix de revient prévisionnels sont difficiles à estimer.

De plus, de multiples contraintes physiques encore assez peu rencontrées et étudiées doivent être prises en compte. Les constructions se doivent en effet d'être robustes, résistantes aux conditions météorologiques extrêmes de l'off-shore (tempêtes, etc.). Les structures doivent être extrêmement fiables car la maintenance en off-shore est plus compliquée et coûteuse que sur la terre. Comme la demande en électricité est énorme, les structures doivent délivrer un maximum de puissance et sont donc généralement très grandes. Cela représente un inconvénient car cela peut gêner l'homme ainsi que la vie marine. La corrosion et le fouling (entartrage) sont également de gros inconvénients qui sont difficiles à contrer.

Un autre inconvénient évident est le raccordement électrique difficile à cause de l'exploitation en off-shore lointain. On ne peut installer les structures trop loin des côtes : il faudrait plus de câbles pour le transport d'électricité, et pour les points d'ancrage, il y aurait moins de stabilité à cause de la plus grande profondeur. Le prix du kilowatt serait ainsi plus élevé. Pourtant, c'est en haute mer que la houle est plus régulière et puissante.

De plus, l'installation des structures est rarement aisée : construire dans 70 mètres de profondeur représente un gros challenge. Il faut également auparavant avoir étudié la bathymétrie (science de la mesure des profondeurs et du relief de l'océan pour déterminer la topographie du sol de la mer, selon Wikipédia) du site d'implantation afin d'avoir les bonnes dimensions pour les structures.

Toutefois, cette énergie vaut la peine d'être étudiée plus en profondeur car elle présente énormément d'avantages :

L'aspect le plus important : la quantité inépuisable d'énergie de la houle. C'est à dire que même si l'on récolte de l'énergie de la houle, elle ne perd pas de sa puissance, ce qui fait de l'énergie houlomotrice une énergie renouvelable comme l'énergie éolienne et à l'inverse du nucléaire. De plus, comme notre planète est recouverte à 70% d'eau, la houle est présente sur d'énormes distances.

Cela nous permet donc de produire de l'énergie sur de longues distances et au long terme. Ce type d'exploitation peut paraître idéal car comparé aux éoliennes terrestre, ces installations ne représentent aucune pollution visuelle. Et comparé au nucléaire, ce n'est pas dangereux, en tout cas pour l'homme. Par rapport à l'énergie solaire, la production d'énergie houlomotrice est jugée deux cents fois plus petite (chiffres de 2011), d'après ehoulomotrice.canalblog.com.

Pour donner une idée chiffrée du potentiel titanesque de nos océans : la capacité de production d'énergie houlomotrice étant estimée entre 2000 et 8000 TWh/an. « En Europe, elle est estimée à 150 TWh/an, avec une puissance moyenne sur la côte atlantique de 45 kW par mètre linéaire de front de vague au large (25 kW par mètre au voisinage des côtes). » selon connaissancedesenergies.org. En Grande-Bretagne, le potentiel d'énergie électrique d'origine houlomotrice est de 50 TWh par an, ce qui équivaut à 5 réacteurs nucléaires. En France, il est estimé à 40 TWh/an, sachant que la consommation d'énergie électrique en France est d'environ 475 TWh/an.

Voici une carte du potentiel houlomoteur indiquant la puissance moyenne en kW / mètre linéaire de front de vague (©2012, d'après carte de Carnegie Wave Energy).

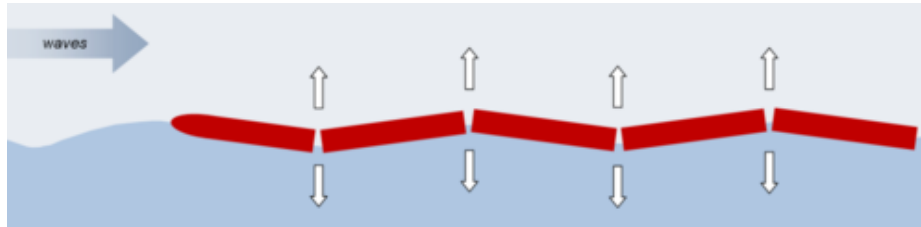


Rien que 0,1% des mouvements marins du globe pourrait soutenir les besoins énergétiques de près de 15 milliards de personnes, selon energiebleue.e-monsite.com. Il faut toutefois prendre en compte que pour arriver à ce résultat, tout l'espace possiblement occupable par les structures

houlomotrices, seraient a priori occupé ! Est-il possible d'agir de la sorte tout en respectant la vie qui s'y trouve actuellement ?

Différents types de structures houломotrices :

Chaîne flottante articulée



Il s'agit d'une structure composée d'un enchaînement de plusieurs flotteurs alignés. Ils sont positionnés perpendiculairement aux vagues. La tête de la chaîne est ancrée au fond marin grâce à un câble. La houle (les vagues) crée une oscillation de la chaîne, qui est exploitée au niveau des articulations pour comprimer un fluide hydraulique. Celui-ci entraîne à son tour une turbine.

C'est ce procédé qui est le plus connu et qui semble le plus prometteur pour l'énergie houломotrice actuellement.

Un des avantages de ce type de système est que l'installation et la maintenance sont relativement faciles, puisqu'il s'agit uniquement de remorquer la structure et de l'amarrer. Toutefois, cela ne peut s'effectuer que lors de certaines saisons et l'engin est très lourd.

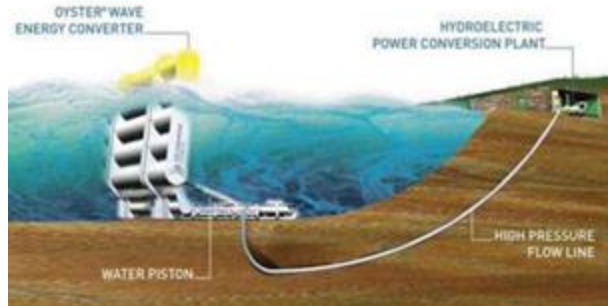
Un autre aspect de ce genre de structure est que l'on peut les couler au fond de l'océan afin de leur donner une nouvelle utilité : récif artificiel. On ne peut pas vraiment parler de recyclage en ce qui concerne cette méthode, mais il pourrait s'agir d'une solution pour gérer les déchets générés par la construction de ces structures. On manque par contre sans doute de recul pour affirmer qu'il s'agit de la meilleure solution ou même d'une solution envisageable, car nous n'avons pas encore pu étudier sur le long terme l'impact de ces récifs artificiels sur la vie sous-marine. Ils peuvent paraître très avantageux aujourd'hui, mais on ne peut pas certifier que dans une centaine d'années les conséquences seront satisfaisantes.

Un des avantages de ce type de systèmes est qu'à la fin de leur vie, on peut les recycler, par exemple en les coulant au fond de l'océan pour qu'ils se transforment en récif artificiel. En créant un récif artificiel, on peut favoriser le développement d'un écosystème riche. Un récif artificiel peut être par exemple des blocs de béton, des carcasses d'automobiles ou de bateaux, voire de vieux pneus. Mais attention, les structures rejetées dans le but de devenir des récifs doivent être implantés dans des sites rigoureusement sélectionnés, pour ne pas déranger la faune et la flore. Le matériau et la forme du déchet jouent un rôle particulièrement important

Le projet le plus avancé de chaîne flottante articulée est le Pelamis. Un engin d'environ 120 mètres de long (produisant 750 kW/h) peut alimenter près de 3000 foyers en un an. On constate qu'un parc de machine d'une surface de 1 km² délivrerait de l'énergie pour alimenter 20 000 foyers, ce qui est tout de même considérable.

En phase de test aux Royaume-Unis depuis 2004, le système Pelamis a été inauguré pour la première fois au large de la côte portugaise en 2008. La société écossaise Ocean Power Delivery a en effet signé leur premier contrat commercial avec le Portugal. Cette structure longue de 124 m qui pèse 750 tonnes a coûté 9 millions d'euros et était prévue pour alimenter 1500 maisons en électricité. Son espérance de vie était d'environ 15 ans. Aujourd'hui, le projet Pelamis semble avoir été arrêté.

Paroi oscillante immergée



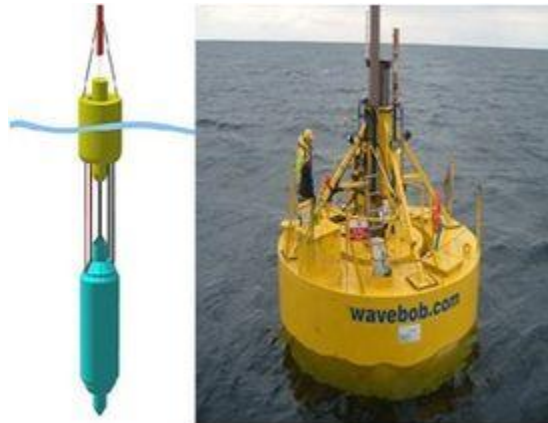
Le passage des vagues entraîne un mouvement orbital de l'eau qui fait osciller le système. Comme le système précédent, ces oscillations permettent d'actionner des pompes pour comprimer et turbiner un fluide hydraulique.

Par exemple, on a le prototype Oyster, développé par Aquamarine Power. Le mouvement du volet entraîne deux pistons hydrauliques qui alimentent en eau à haute pression, une turbine hydroélectrique terrestre, qui entraîne un générateur pour produire de l'électricité.

Ce système présente plusieurs inconvénients. On peut tout d'abord voir que le système est assez imposant : il est installé dans environ 10 mètres de profondeur, est relié au sol et s'étend jusqu'à la surface de l'eau, la paroi parallèle à la côte, pèse 200 tonnes. Il s'agit donc d'une structure plus dérangeante pour la faune sous-marine que la chaîne flottante articulée. De plus, l'installation et la production d'Oyster est difficile et chère : de par son poids et sa taille, il doit être emmené en mer sur une grande péniche plate et installé en plusieurs étapes compliquées. En outre, les turbines et générateurs peuvent créer une pollution sonore et ainsi gêner la faune sauvage sur la côte. Toutefois, on s'attend à ce que ce bruit soit couvert par le bruit naturel du vent et des vagues. Du bruit et des vibrations sous-marines seront aussi présents, ce qui interférerait avec la vie animale, masquant les sons naturels, gênant la communication entre espèces, induisant du stress, et pouvant même causer la perte d'audition d'espèces marines. Il pourrait également détruire l'habitat de certaines espèces.

Oyster est prévu pour produire 800 kW, ce qui est à peu près égal à la production d'un Pelamis, pour une structure plus imposante. On préférera donc la chaîne flottante articulée. Oyster 800 a été connecté au réseau en juin 2012 au site d'essai de l'EMEC à Billia Croo, jusqu'à ce que le programme d'essais prenne fin en 2015, date à laquelle la société a cessé ses activités, bien que les tests soient concluants. Aquamarine Power espère commercialiser Oyster et a déjà signé un accord avec l'Ecosse et Southern Energy pour développer des fermes houlomotrices produisant jusqu'à 1000 MW d'ici 2020.

Colonne à oscillation verticale



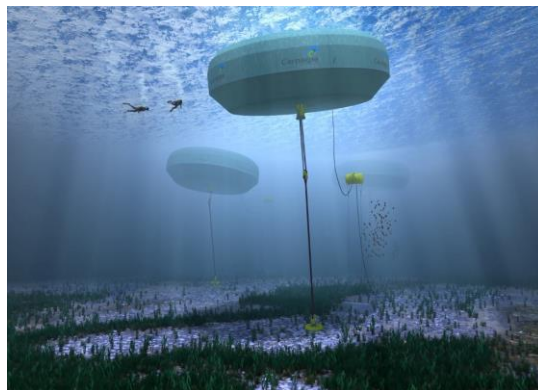
C'est une structure qui flotte à la surface de la mer et qui transforme tous les mouvements horizontaux ou verticaux en déplacements de masselottes. (Masselottes = éléments utilisant la force centrifuge pour créer un travail). L'énergie liée aux masselottes en mouvement est utilisée pour actionner une pompe et mettre sous pression un fluide hydraulique qui permet ensuite de faire tourner une turbine entraînant à son tour un alternateur.

Par exemple on a le système Wavebob, développé depuis 1999 et testé depuis 2006 en Irlande, mais dont la société porteuse a dû cesser ses activités pour cause de difficultés à trouver des fonds

L'avantage d'un système comme celui-ci, est qu'il utilise l'eau de mer comme masse d'inertie, ce qui permet de réduire les coûts des matériaux de construction de la structure.

Mais comme tous les autres modèles, il doit être assez solide pour résister aux conditions météorologiques extrêmes du off-shore ainsi qu'à l'érosion, et doit veiller à ne pas déranger la vie sous-marine. On peut cependant s'imaginer qu'un système non ancré au sol gêne moins la faune et la flore qu'un système accroché au fond sous-marin, ce qui est par exemple le cas de la paroi oscillante immergée.

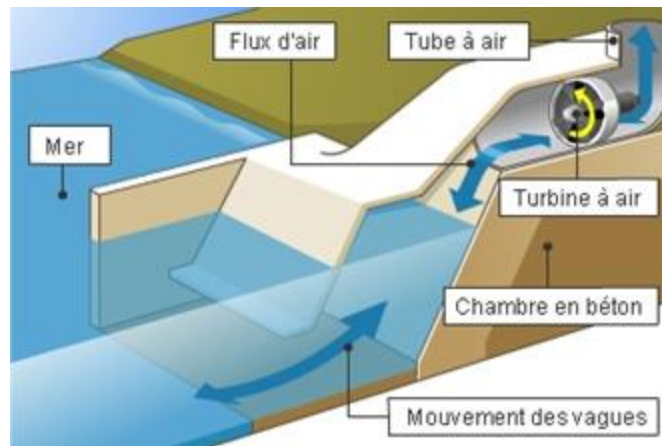
Capteur de pression immergé



Il s'agit d'un « système ancré au fond marin qui utilise le mouvement orbital des vagues pour comprimer un fluide hydraulique. Le capteur le plus simple à utiliser est un ballon. Il est possible de constituer un réseau de capteurs et recueillir le fluide comprimé à terre où il est turbiné pour produire de l'électricité. » d'après le site connaissancedesenergies.org.

Le projet le plus avancé de capteur de pression est mené par Carnegie Clean Energie. Le projet se nomme CETO et est en route depuis 2012 (d'après le site officiel de Carnegie Wave), mais le plus récent est CETO 6 et il date de 2015. Il est localisé en off-shore à Garden Island (en Australie-Occidentale), et est supporté par le gouvernement fédéral australien, qui a donné à ARENA (Australian Renewable Energy Agency) \$11M, ainsi qu'une facilité de crédit de la Banque du Commonwealth d'Australie. Cette nouvelle génération du CETO a pour but une capacité de 1MW, ce qui est semblable à la production attendue pour le Pelamis par exemple, ce qui est donc prometteur. Ce design est la plateforme de production qui va être utilisée dans les projets commerciaux CETO.

Colonne d'eau



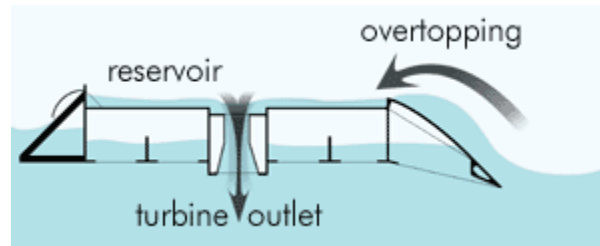
Ce système est formé « d'une structure flottante en acier ou en béton, ouverte à la base et fermée sur le dessus. Les vagues font monter et descendre le niveau de l'eau dans la colonne. Cela a pour effet de comprimer et de décompresser alternativement de l'air emprisonné dans la partie supérieure de la colonne. L'air active alors une turbine bidirectionnelle pour produire de l'électricité. » d'après le site connaissancedesenergies.org.

L'avantage de ce type de structure est qu'elle peut être installée au large tout comme sur le rivage, chaque situation présentant des avantages et des inconvénients. Sur le rivage, la colonne d'eau, étant assez imposante par sa taille, encombre beaucoup le rivage, gênant la faune, la flore et l'activité humaine, en plus de représenter une pollution visuelle importante. Par contre, elle peut facilement être reliée pour amener et stocker l'électricité. Au large, l'inconvénient est qu'il faut déjà qu'il y ait au minimum 70m de profondeur, et une si grande distance de la côte signifie plus de difficulté à ramener l'énergie à la terre. D'un autre côté, en étant au large, la structure ne représente plus une pollution visuelle mais elle continue d'être un grand obstacle imposé au fond de l'eau qui peut gêner la vie sous-marine.

Un autre avantage de ce type de mécanisme est que, ayant moins de parties mécaniques en mouvement et en contact avec l'eau, on peut s'attendre à une meilleure fiabilité et résistance de la structure que les systèmes vus précédemment.

Le désavantage est que, pour tous les prototypes établis, la puissance délivrée est bien inférieure à celle fournie par les autres types de systèmes houlomoteurs. On va de 100 kW (le projet Limpet de Wavepower) à 450kW (le projet d'Oceanlinx), ce qui est pour l'instant trop faible par rapport à la taille de la structure.

Piège à déferlement



Avec le piège à déferlement (ou franchissement), l'eau des crêtes de vagues est emprisonnée dans un bassin situé légèrement au-dessus du niveau de la mer, créant une surpression dans le réservoir. Le volume d'eau piégée est évacué via un conduit dans lequel il va être turbiné afin d'obtenir de l'électricité via un générateur.

Un avantage de ce type de systèmes est que, tout comme la colonne d'eau, moins de parties mécaniques se trouvent en mouvement, ce qui peut contribuer à une meilleure fiabilité. Il est toutefois également très imposant par sa taille, il faudra donc arriver à un rendement très élevé si l'on veut que le système soit rentable.

Le Wave Dragon, un projet danois mené par Wave Energy Technology, est un système de piège à déferlement ressemblant à un entonnoir géant. « Il se compose de deux déviateurs qui forcent l'eau à se diriger vers la rampe pour s'échouer dans le bassin. Des turbines de type Kaplan sont activées lorsque l'eau dévale dans les conduits. » Les tests du prototype entre 2003 et 2005 ont été jugés concluants et depuis 2011, Wave Energy Technology développe un Dragon Wave plus imposant, d'une puissance de près de 1,5 MW, ce qui est prometteur.

4. L'énergie thermique des mers

L'énergie thermique des mers (ETM) désigne l'**énergie exploitable grâce au différentiel de température des océans entre les eaux de surfaces et les eaux profondes**. Elle est aussi appelée énergie maréthermique ou « Ocean Thermal Energy Conversion » (OTEC) en anglais. L'énergie exploitée est ensuite convertie en énergie électrique.



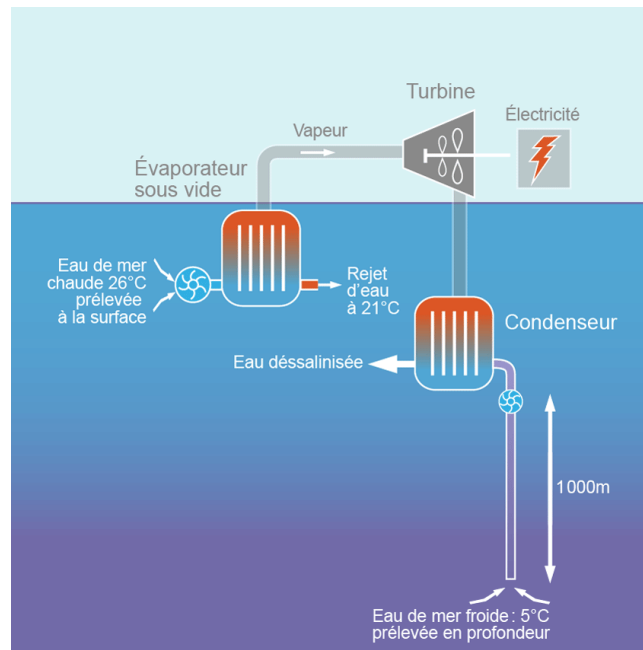
L'idée d'exploiter la différence de température entre les eaux de surfaces et celles des profondeurs grâce à un fluide vaporisé pour produire de l'électricité trouve son origine en 1881 par Arsène D'Arsonval. En 1926 Georges Claude, qui reprend avec Paul Boucherot les idées de son professeur, présente devant l'Académie des Sciences le « procédé Claude et Boucherot », connu aujourd'hui sous le nom d'Énergie Thermique des Mers. Très mal accueillie par les scientifiques de son époque Georges Claude expérimente ce procédé à Ougrée (1928) puis à Cuba (1930). Ces expériences lui confirment que le bilan énergétique est positif et qu'il nécessite un écart de température de 20°C. En 1933, il se lance dans un projet ambitieux : utiliser un cargo comme usine à glaces dont la production serait alimentée par de l'électricité produite grâce à l'énergie thermique des mers. Le projet est un échec et sera arrêté l'année suivante.

Nous allons maintenant expliciter le fonctionnement d'une centrale thermique des mers. Mais tout d'abord, il est intéressant de connaître la raison de l'écart de température observé entre les eaux de surfaces et les eaux profondes. Les océans, comme les mers, captent les rayons du soleil. Les rayons solaires sont absorbés de manière optimale au niveau de la zone intertropicale car ils touchent perpendiculairement la surface de l'eau. L'énergie solaire absorbée par l'eau diminue avec la profondeur, au contraire la masse volumique de l'eau augmente avec la baisse de température. Ainsi, les volumes d'eau froide restent en profondeur et ne se mélangent pas avec l'eau chaude de la surface.

Le principe d'une centrale d'ETM est de pomper des volumes d'eau chaude et d'eau froide afin d'exploiter l'écart de température pour produire de l'électricité. Pour cela, on utilise l'inverse du procédé d'un réfrigérateur. Cette exploitation ne représente qu'un intérêt en zone intertropicale où l'écart de température est de 20°C (en moyenne : 24°C en surface contre 4°C à 1000m). Intéressons-nous à ce qui compose une unité de production. Premièrement un ensemble évaporateur-turbine-condenseur, puis des conduites et des pompes d'alimentation en eau chaude et froide, et enfin une infrastructure pour des équipements connexes. Il existe trois types de centrales ETM possibles :

Les centrales ETM à cycle ouvert : de l'eau de surface est pompée et traverse un évaporateur sous vide (la pression y est plus importante). Une faible partie de l'eau est vaporisée et fait tourner une turbine qui produit de l'électricité. À noter que l'eau sous forme de vapeur ne contient pas de sel ; ce type de centrale peut également produire de l'eau douce. Ensuite, la vapeur d'eau est acheminée vers un condenseur où elle est refroidie au contact de l'eau froide pompée en profondeur.

Les centrales ETM à cycle fermé : le principe est le même sauf qu'on utilise un fluide caloporteur à la place de l'eau, en général de l'ammoniac. Le fluide est vaporisé dans l'évaporateur au contact de l'eau chaude, fait tourner la turbine et repasse à l'état liquide lors de son passage dans le condenseur en transmettant ses calories à l'eau froide.



Les centrales ETM à cycle hybride : c'est un circuit fermé couplé à un circuit ouvert afin de produire de l'eau douce.

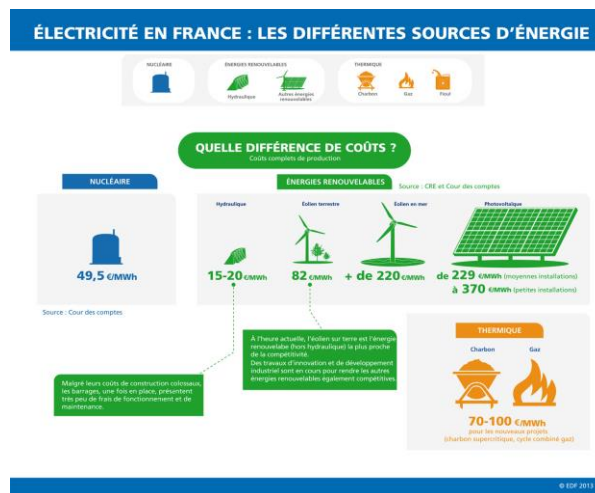


Le débat redondant, comme pour toute source d'énergie électrique, est de savoir si une centrale ETM est rentable. L'ETM présente l'intérêt d'être prévisible, abondante et disponible 24 heures sur 24 toute l'année en zone intertropicale, c'est-à-dire entre les deux tropiques.

Malheureusement, l'efficacité énergétique de ce type de centrale est tout de même limité par l'écart peu important de température. Cet écart de température doit être compensé par un débit d'eau important. Or, puiser de l'eau froide en profondeur peut s'avérer gourmand en énergie. Ainsi, selon l'Ifremer, même en optant pour des conduits de grands diamètres (8 m ou plus) le pompage de l'eau froide représenterait à minima 20% de la puissance brute générée par la centrale. De plus, le rendement maximal d'une centrale thermique des mers est évalué à 6,8% pour une centrale en cycle fermé avec une température de 4°C en profondeur et de 24°C en surface. Au contraire, une centrale à gaz a un rendement de 40%. Et il ne faut pas oublier qu'une centrale ETM consomme également de l'énergie pour pomper de l'eau de mer et conserver l'évaporateur sous vide, dans le cas d'un cycle ouvert. Le rendement est donc inférieur à 6,8%. Cela induit un coût important de l'électricité produite. Pour 1 MW installé il faut actuellement 20M€, par conséquent les coûts de production sont de 500€/MWh. Par comparaison, les coûts de productions de l'électricité éolien terrestre sont de 82€/MWh. Malgré tous ces points noirs, il convient de noter que le coût pourrait diminuer par effet d'échelle et par apprentissage jusqu'à 10M€/MW installé auquel il faudrait rajouter les coûts de raccordements aux réseaux. Avec une telle diminution des coûts l'énergie thermique marine deviendrait une énergie compétitive sur la zone intertropicale. De plus, le potentiel global de l'ETM dans le monde serait de 10 000 TWh/an, c'est-à-dire un peu plus de la moitié de la consommation mondiale. En France, le potentiel de production pourrait atteindre 1,4 TWh en 2020 soit 0,3% de la consommation intérieure brute.

En conséquence, l'ETM ne nous paraît pas comme une solution viable économiquement pour l'instant. D'autre part, un gradient de température de 20°C minimum doit être observé entre les eaux de surface et les eaux froides, profondes d'environ 1000 m. Ces critères assurent une centrale produisant 3 à 5 fois plus que ce qu'elle consomme.

L'ETM paraît donc être une solution pour des pays possédant un espace maritime, remplissant ces conditions, d'accroître leur indépendance énergétique. C'est pourquoi on observe des investissements en Australie, à Taïwan et surtout au Japon.



Cependant, la centrale ETM présente l'énorme avantage d'utiliser une énergie renouvelable/inépuisable, ce qui en fait une énergie propre. Par exemple, la centrale ETM est clairement moins dangereuse pour l'environnement qu'une centrale électrique thermique lambda. L'émission de CO₂ est 100 fois moins élevée qu'une centrale électrique thermique commune. De

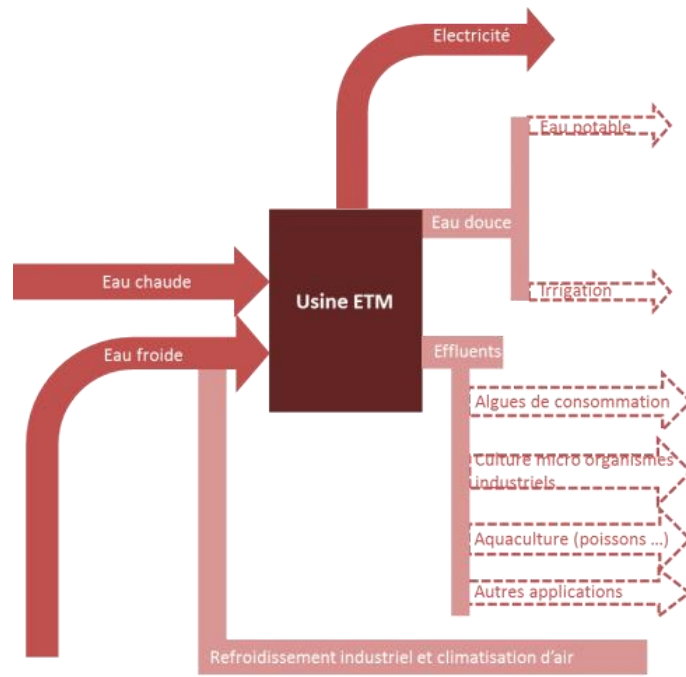
plus, elle présente l'avantage de pouvoir engendrer un upwelling, c'est-à-dire une remontée d'eau en surface. En effet, en rejetant l'eau de pompage en profondeur plus chaude et donc moins dense, l'eau remonte à la surface. Selon des observateurs, l'upwelling serait bénéfique à l'accroissement de la production biologique, les nutriments riches, base de la nourriture de la faune maritime, améliorant la photosynthèse remontent la surface. Cependant, un faible risque de phénomène d'eutrophisation est possible. Malgré son image d'une « centrale verte » elle n'est pas non plus sans danger pour l'environnement : la mort de poissons entraînés par le pompage de l'eau, le réchauffement des eaux profondes provoquant à terme une élévation du niveau de la mer², l'utilisation du chlore ou de faibles doses de biocide pour éviter la bio-salissure et les dépôts marins... Cependant, les risques sont réduits et des laboratoires doivent déterminer si ces centrales ont un impact sur la structure thermique des mers.

Désormais, afin de nous faire un avis, pesons le pour et le contre de cette énergie. D'un côté, l'Energie Thermique des Mers répond à deux critères des énergies nouvelles : elle est renouvelable et propre. De plus, elle offre la possibilité de produire de l'électricité durant toute une année sans discontinuité. Elle fonctionnerait donc 3,5 fois plus longtemps qu'une centrale éolienne (environ 2500 heures contre 8760 heures). Cependant de l'autre côté, les coûts d'investissements sont très importants du fait d'infrastructures importantes (lié au pompage en profondeur, aux conduits qu'il faut installer à -1000m, aux raccordements avec le réseau national, etc....) et la zone d'application est limitée à la zone intertropicale³. A noter que les centrales ne doivent pas être trop éloignées des côtes sous peine d'augmenter les coûts d'installations.

Au final, l'ETM paraît être une énergie très intéressante pour servir de complément à la production d'un territoire de la zone intertropicale et augmenter son indépendance énergétique. On espère, pour le futur, que les coûts d'installations auront diminués autant qu'annoncés, c'est-à-dire de moitié, pour que cette énergie pleine de potentiel puisse être commercialisée et devienne très compétitive sur la zone intertropicale. Cependant, il est clair que la France métropolitaine doit se tourner vers d'autres alternatives pour alimenter son réseau.

²L'effet serait a priori sans conséquence (car proportionnellement trop faible par rapport au volume d'eau que représente les mers) sauf s'il y avait une concentration extrême de ce type de centrale dans une certaine zone.

³La zone d'application est limitée mais tout de même plus importante que celle de l'énergie marémotrice.

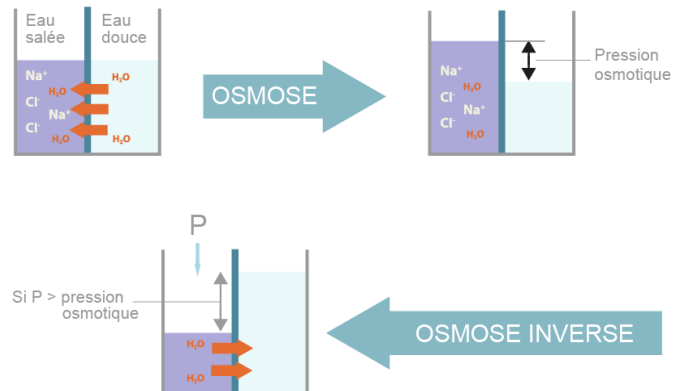


5. L'énergie osmotique

La dernière énergie que nous aborderons est l'énergie osmotique, celle-ci étant encore réduite à l'état de prototype et de démonstration. Son fonctionnement, que nous détaillerons plus tard dans le rapport, se base sur la différence de salinité entre les fleuves et les océans au niveau des estuaires. Si cette énergie est encore la moins avancée par rapport aux autres énergies marines, c'est en grande partie dû aux rendements en énergie encore faibles au vu des investissements mis en œuvre.

Le procédé d'osmose voit le jour en 1960 grâce aux chimistes Srinivasa Sourirajan et Sidney Loeb, en inventant une membrane semi-perméable laissant passer l'eau douce et retenant l'eau salée. Il faut attendre les années 1970-1980 pour que l'on s'intéresse au procédé d'osmose dans un but de production d'énergie. En 2009, la société norvégienne Starcraft, aujourd'hui considérée comme le chef de file de l'énergie osmotique, met au point le premier prototype de centrale osmotique.

L'énergie osmotique se base sur la différence de concentration de deux milieux aqueux différents pour produire de l'électricité. En effet si on met en contact deux liquides de concentrations différentes à travers une membrane perméable, ceux-ci vont naturellement se mélanger : c'est le phénomène d'osmose. On retrouve ce phénomène dans la nature, notamment aux estuaires, où l'eau fluviale non salée vient se jeter dans la mer, salée quant à elle. Les centrales osmotiques reposent donc sur la différence de salinité des eaux des fleuves et des océans. Il existe deux façons de produire de l'énergie en se basant sur le phénomène d'osmose : par le déplacement des électrons à travers la membrane, ou en turbinant la différence de pression créée par la membrane.



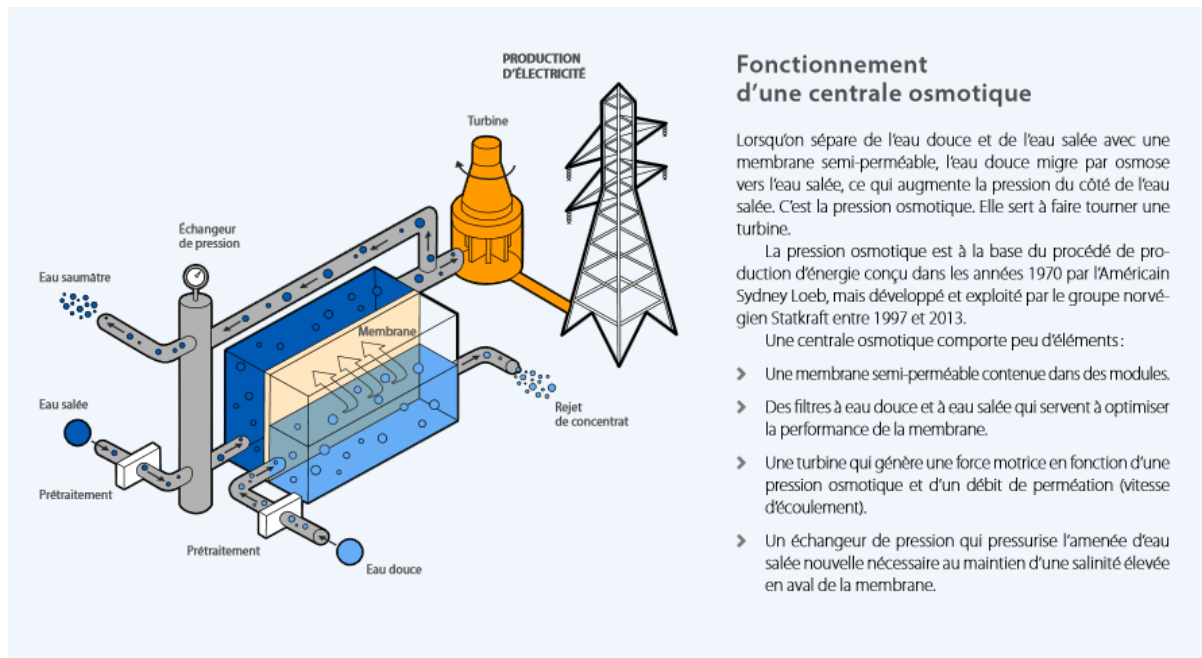
L'eau salée des mers est riche en ions chlorure et sodium Na⁺ et Cl⁻ tandis que l'eau douce en est totalement dépourvue. Lors du phénomène d'osmose (se référer à la figure 1), on utilise une membrane semi-perméable (ou sélective) qui laisse passer les ions chargés positivement et repousse les ions chargés négativement. Donc seule l'eau douce peut passer à travers la membrane. Cela est possible car la membrane est munie de nanopores laissant seulement passer les molécules d'eau H₂O de petite taille et retenant les sels marins de plus grosse taille, à savoir les ions de grosse

taille Na^+ et Cl^- . De ce fait la membrane retient les sels marins et empêche l'eau douce de devenir salée.

Le phénomène se produit dès qu'il existe une différence de concentration, même minimale, néanmoins plus la différence de concentration est élevée, plus le phénomène est important.

La première façon de produire de l'énergie se base sur le déplacement des électrons, aussi la membrane choisie a toute son importance. Plus la membrane est fine, plus les rendements sont importants. En 2016, l'EPFL met au point une membrane sélective épaisse de trois atomes en disulfure de molybdène, dont la surface est recouverte à 30% de nanopores. Lorsque les ions des sels marins traversent ladite membrane, ils sont transférés à une électrode. C'est le déplacement des atomes qui produit ainsi le courant électrique. « Nous avons fabriqué les nanopores, puis mené une étude pour que leur taille soit optimale. Si l'ouverture est trop grande, la sélection des ions est moins importante, et la tension trop basse. A l'inverse, si elle est trop petite, le débit des ions est insuffisant, et le courant diminue », explique un des concepteurs de la membrane, Jiandong Feng. « C'est la première fois qu'un matériau en deux dimensions est utilisé pour ce type d'application », rapporte Alexandra Radenovic, directrice du laboratoire d'EPFL. D'après les estimations du laboratoire, techniquement, avec une telle membrane, un mètre carré suffirait à produire 1 MW, soit de quoi alimenter 50 000 ampoules électriques économiques. À titre de comparaison, une éolienne en fonctionnement produit 2 MW. Cependant cette manière d'exploiter l'énergie osmotique n'est encore qu'au stade de développement et n'a pour le moment jamais été mise en œuvre à grande échelle.

La deuxième façon de produire de l'électricité grâce au phénomène d'osmose se base sur la différence de pression engendrée de chaque côté de la membrane. En effet comment on peut le voir sur le premier schéma, la membrane étant sélective, la hauteur d'eau du côté de l'eau salée de la membrane est supérieure au côté de l'eau douce, et de cette différence de hauteur résulte également une différence de pression. Dans le cas d'une centrale osmotique, deux conduits acheminent l'eau douce et l'eau salée de chaque côté de la membrane sélective. Dans la centrale entre 80 et 90 % de l'eau douce traverse la membrane et entraîne ainsi une surpression dans le réservoir d'eau salée. Cette surpression dans le réservoir fait fonctionner une turbine qui produira ensuite de l'électricité. Le phénomène d'osmose assure donc un débit constant d'eau qui peut être turbiné et qui produit ainsi de l'électricité.



Fonctionnement d'une centrale osmotique

Lorsqu'on sépare de l'eau douce et de l'eau salée avec une membrane semi-perméable, l'eau douce migre par osmose vers l'eau salée, ce qui augmente la pression du côté de l'eau salée. C'est la pression osmotique. Elle sert à faire tourner une turbine.

La pression osmotique est à la base du procédé de production d'énergie conçu dans les années 1970 par l'Américain Sydney Loeb, mais développé et exploité par le groupe norvégien Statkraft entre 1997 et 2013.

Une centrale osmotique comporte peu d'éléments :

- Une membrane semi-perméable contenue dans des modules.
- Des filtres à eau douce et à eau salée qui servent à optimiser la performance de la membrane.
- Une turbine qui génère une force motrice en fonction d'une pression osmotique et d'un débit de perméation (vitesse d'écoulement).
- Un échangeur de pression qui pressurise l'amenée d'eau salée nouvelle nécessaire au maintien d'une salinité élevée en aval de la membrane.

Une centrale osmotique, de par son fonctionnement simple, comporte peu d'éléments :

- les pompes et les conduites acheminant l'eau dans les réservoirs
- un échangeur de pression pressurant l'eau salée en amont
- une station d'épuration et des équipements de lavage des membranes permettant d'éviter leur encrassement
- la turbine couplée à un alternateur productrice d'électricité.

Un débit de $10\text{m}^3/\text{s}$ d'eau permet à une centrale osmotique de produire 6 MW, ce qui correspond à une production annuelle de 50 GWh. À titre d'exemple, un fleuve comme le Rhône assurant un débit de $1800\text{m}^3/\text{s}$ assurerait une production en énergie de 1080 MWh soit 9 TWh à l'année.

La société norvégienne Statkraft a déjà mis en service un premier prototype de centrale osmotique d'une puissance de 4 kW en novembre 2009. La centrale comporte à ce jour $2,000\text{m}^2$ de membrane ce qui correspond à un rendement de $2\text{W}/\text{m}^2$ de membrane. Statkraft a pour projet d'atteindre une puissance de $5\text{W}/\text{m}^2$ de membrane.

Les centrales osmotiques présentent l'avantage indéniable de pouvoir fonctionner en continu et offre une très bonne prédictibilité en production d'énergie électrique, contrairement aux autres énergies renouvelables comme l'éolien ou le photovoltaïque. À titre d'exemple, une centrale osmotique peut produire de l'énergie sur une durée 3 à 4 fois supérieure à celle d'une éolienne. Une centrale osmotique peut être implantée à toute embouchure de fleuve et peut très bien être une installation de petite ou à grande échelle. L'implantation des centrales osmotiques au niveau des côtes, c'est-à-dire non loin des centres de consommation limite le transport de l'électricité produite. L'impact environnemental d'une centrale osmotique est négligeable, puisque son fonctionnement se réduit à exploiter un mélange naturel aux embouchures, elle n'émet ni polluant ni bruit. Néanmoins elle pourrait modifier l'habitat et la végétation de la faune aquatique dues aux modifications de salinité. Enfin une centrale pourrait nuire à certaines activités humaines comme la pêche, la navigation, etc.

On estime à environ 10 000m³/s le potentiel des côtes métropolitaines, néanmoins une partie non négligeable s'écoule à la mer par infiltration ou par résurgence, ce qui la rend difficile à capter. D'après les estimations de la société Starkraft, on pourrait avoisiner une production mondiale annuelle de 1700 TWh (soit la moitié de la production électrique européenne) si l'on faisait le choix d'exploiter toutes les embouchures de fleuves, de quoi couvrir environ 10 % des besoins mondiaux en électricité.

Des projets pilotes sont menés en Norvège, aux Pays-bas, au Japon et aux États-Unis. À ce jour, le principal frein au développement à l'énergie osmotique constitue les coûts élevés de production des membranes ainsi que leur nettoyage, leur encrassement étant dus aux résidus présents dans l'eau. Même avec un prétraitement poussé de l'eau, il faudrait changer les membranes tous les 5 à 7 ans. C'est pour cela que les centrales osmotiques ne peuvent s'implanter qu'à l'embouchure de fleuves propres. En Suède, une étude de faisabilité réalisée par ABB Alstom Power pour la société Starkraft a conduit à un abandon de la solution en raison d'un coût prohibitif, notamment en ce qui concerne le nettoyage des filtres et des membranes.

V. Comparaison des différentes énergies

À l'heure actuelle, les énergies marines ne permettent à aucun pays de satisfaire ses besoins en électricité, ni même en couvrir 10%. En effet que ce soit les hydroliennes, les usines maréthermiques, marémotrices et osmotiques ou les machines houlomotrices, toutes ces sources d'énergie ne sont aujourd'hui qu'au stade de recherche et d'expérimentation. En effet, de nombreux tests sont effectués sur des prototypes de machines afin de déceler toute faille mais surtout et aussi de prévoir et quantifier les impacts environnementaux sur la faune et flore et la robustesse des futures machines. Comme on a pu le voir précédemment : il est extrêmement compliqué d'implanter pour plusieurs années des engins technologiques au fin fond des océans puisque le milieu y est fortement hostile. Hormis la corrosion due au sel et au sable, les machines doivent résister aux tempêtes, aux courants marins, etc. De plus, il se pose une question essentielle à laquelle les ingénieurs se confrontent actuellement : comment raccorder les machines au réseau électrique terrestre ? Aujourd'hui, la seule solution technique envisagée est celle de les raccorder à l'aide de câbles géants, 27 cm de diamètre et 130 kg au mètre linéaire, intégrant plusieurs conducteurs électriques et câbles de télécommunication à fibre optique. Ces "gainés" sont ensuite ensouillées dans des tranchées de 1m de hauteur et permettent de rejoindre la terre ferme où des "chambres de jonction" permettent aux câbles marins de transmettre l'électricité aux câbles et réseaux terrestres.

Cependant, de ces nombreuses énergies marines, il y en a certaines qui ont su tirer leur épingle du jeu plus facilement que d'autres. Ainsi, on peut aisément remarquer que les usines osmotiques restent à l'heure actuelle figées au stade d'expérimentation puisque leur coût de fabrication et de fonctionnement reste bien trop élevé pour permettre de les rentabiliser. Les usines maréthermiques sont elles aussi confrontées à de nombreuses impasses financières et techniques. En effet, il est à l'heure actuelle compliqué de construire ces usines qui descendent jusqu'à 1000 m de profondeur. De plus ces centrales ne peuvent être placées uniquement dans les zones où les différences de températures excèdent 20°C, c'est-à-dire les tropiques. C'est pourquoi il est complexe de développer cette énergie puisque peu de pays développés se trouvent aux tropiques ou ont les moyens de construire ce type d'usine, qui reste peu rentable en comparant aux usines utilisant des énergies fossiles. Quant aux usines marémotrices, la nécessité d'avoir un marnage très important empêche leur développement. Bien que l'usine de la Rance ait été mise en fonctionnement dès les années 1960, elle reste aujourd'hui l'une des seules à être en fonctionnement. De plus, les barrages entraînent de nombreuses modifications sur les écosystèmes. Par conséquent, seules les machines hydroliennes et houlomotrices semblent être commercialisables dans un avenir très proche. Cependant, les systèmes houlomoteurs sont encore pour l'immense majorité en plein développement. Les technologies n'ont encore jamais été testées en pleine mer sur de longues durées en ayant abouti à un contrat commercial. C'est pourquoi, l'énergie houlomotrice semble à un stade moins avancé de commercialisation que les hydroliennes. En effet, l'industrie de l'hydrolien est aujourd'hui lancée : de nombreuses machines sont installées dans des parcs pilotes à travers le monde et les premières mises en service apparaissent. De plus, plusieurs groupes ont amorcé leur spécialisation et la construction d'usines destinés à fabriquer des hydroliennes. Il faut tout de même relativiser cette "commercialisation" puisque toutes ces énergies réunies ne permettent la production que de quelques centaines de MW sur Terre. Et, ces chiffres ne devraient pas exploser dans les 5 à 10 prochaines années.

VI. La place des énergies marines renouvelables dans la politique

Depuis le début du 21^{ème} siècle, la question du développement durable s'introduit de plus en plus dans les discours et programmes politiques. Notamment à partir de novembre 2015, la COP21 à Paris a permis la signature de l'Accord de Paris sur le climat, traité regroupant les signatures de 195 délégations, et entré en vigueur le 4 novembre 2016.

Ce traité a pour but d'obliger chaque pays à se plier en faveur du développement durable en soumettant régulièrement ses objectifs de production de gaz à effet de serre à des grilles de renseignements et d'analyses communément partagées.

2016 ayant été comme l'année la plus chaude jamais enregistrée, des mesures doivent en effet être prises radicalement, ce qui montre bien que cet accord rappelle bien le principe des responsabilités communes. La France ayant été organisatrice et hôte de la signature de cet accord, elle s'est engagée à réduire de 40 % ses émissions d'ici 2030, et de 75 % d'ici 2050. Pour parvenir à ses fins, elle s'est engagée à porter à 32 % la part des énergies renouvelables dans la consommation énergétique finale en 2030, tout en réduisant sa consommation énergétique.

La place des énergies marines renouvelables au sein des différents partis politiques

Or, malgré cet accord, le développement des énergies renouvelables semble peiner à avancer, notamment par rapport aux énergies marines renouvelables. En effet, pour l'instant, l'énergie éolienne est la seule principalement en déploiement sur le territoire français. Les énergies marines renouvelables ayant été seulement plus tard développées, ou alors ayant un rendement et des applications moindres, comme les usines marémotrices, cela est compréhensible.

Toutefois, plus récemment, lors des élections présidentielles de 2017, peu de candidats ont pris des engagements en faveur des énergies renouvelables.

Tout d'abord, les principaux engagements pris par les candidats au sujet des types de production d'électricité concernent le nucléaire. On peut voir une divergence des propositions en fonction des positions de chaque parti, de la droite à la gauche.

Les partis de droite sont pour la prolongation de l'exploitation des centrales nucléaires. Par exemple, François Fillon souhaite prolonger l'exploitation des centrales de 40 à 60 ans, ainsi que renforcer les recherches sur le développement des réacteurs de 4^e génération, utilisant le thorium.

En comparaison, Jean-Luc Mélenchon, Benoît Hamon et Philippe Poutou sont pour une baisse considérable de cette production d'électricité.

Par rapport à la transition énergétique, tous les candidats étaient d'accord sur une volonté de développer les énergies renouvelables en France, mais ils diffèrent sur les délais et objectifs à fixer.

Le candidat d'En Marche et maintenant Président de la République, Emmanuel Macron affirme vouloir atteindre 32 % d'énergies renouvelables en 2030, tandis que B. Hamon vise sur 50 % d'énergie verte d'ici 2025. De leurs côtés, J-L. Mélenchon et P. Poutou sont d'accord pour atteindre l'objectif de 100 % d'énergies renouvelables en 2050.

F. Fillon, veut quant à lui l'arrêt total de production d'électricité provenant d'énergies fossiles, mais au profit du nucléaire, tandis que Mme. Le Pen ne se prononce pas particulièrement sur quels types de source d'énergie il faut développer.

Parmi tous les candidats, seulement J-L. Mélenchon soutient pleinement et précisément le développement des énergies marines renouvelables.

En effet, pour le leader de La France insoumise, l'investissement trop important du gouvernement dans le nucléaire détruit toutes les chances de développement des EMR. Le manque de budget a causé le passage des deux piliers des énergies marines que sont la filiale d'Areva et Alstom Energie Marine, sous contrôle respectivement de General Electric et d'une filiale de Siemens, entreprise allemande.

Il supporte donc totalement le manque d'investissement du gouvernement dans le développement des usines marines à énergie verte, du fait que EDF ne s'y implique que trop peu, alors qu'il est possédé à 85 % par l'État, qui doit, selon le Traité de Paris, favoriser ces énergies renouvelables.

Vers un développement futur des énergies marines renouvelables

Les énergies renouvelables bénéficient d'une bonne image dans l'opinion publique. La filière de l'éolien terrestre dispose d'une forte acceptabilité sociétale, alors qu'elle est au contraire plus faible quand il s'agit de son implantation concrète sur un territoire donné.

Les énergies marines, de leur côté, semblent être plutôt bien acceptées de prime abord. Afin de les développer, en plus d'un investissement par le gouvernement et des sociétés spécialisées, il faut que l'opinion publique soit en faveur des aménagements proposés. Or ceci peut être compliqué dans certains cas, de par le fait que très peu de sites sont connus en France.

Une opposition aux projets est donc présente, mais reste très hétérogène.

Plusieurs grandes catégories d'opposants semblent pouvoir être distinguées sur la question de l'éolien offshore au large de Saint-Nazaire et en baie de Saint-Brieuc : les résidents (qui sont souvent surtout des résidents secondaires), les associations environnementales, le monde de la pêche, ainsi que les opposants antinucléaires tissant des liens entre critique du nucléaire et critique du renouvelable industriel. Les critères de distinction reposent sur la présence de différents arguments mobilisés par chacun de ces groupes, des arguments qui peuvent se recouper ou sembler contradictoires.

Ces arguments mobilisés pour justifier d'une position contre les énergies marines renouvelables sont variés et peuvent être regroupés en quatre types : les arguments mobilisant la problématique du cadre de vie, les arguments émanant d'une critique des procédures de concertation, les arguments de nature socio-économique et enfin les arguments reposant sur des enjeux environnementaux.

Pour conclure, les politiques ont des avis différents sur le devenir des énergies marines renouvelables en France, en fonction de leurs partis, avec toutefois un soutien plus important dans les partis de gauche. De plus, les citoyens français ont également des avis qui diffèrent. Les énergies marines sont globalement acceptées par l'opinion publique, mais des groupes d'opposition contestent leur développement et installation. Ces groupes d'opposition n'ont pas forcément tous les mêmes arguments, rendant les contestations très hétérogènes.

Le manque d'investissement des politiques et ces groupes anti EMR n'aident pas à améliorer le futur des énergies marines renouvelables, malgré le fait que la France possède la deuxième plus grande superficie de Zone économique exclusive (espace maritime sur lequel on peut effectuer des installations) mondiale.

Conclusion

En conclusion, nous avons pu voir que l'océan est une source à la fois inestimable et inépuisable d'énergie, qu'il existe plusieurs types d'énergies marines renouvelables, toutes aussi différentes les unes des autres. Certaines sont cependant plus développées que d'autres à l'heure actuelle, par conséquent, plus prometteuses, selon leurs avantages et inconvénients, parmi elles : l'énergie marémotrice, hydrolienne ou encore l'énergie thermique des mers. En effet, l'énergie houlomotrice ne présente aujourd'hui aucun projet concret, il en va de même pour l'énergie osmotique qui demeure encore au stade de développement. Toutefois, certaines ont été découvertes il y a plusieurs dizaines d'années, sont plus anciennes que d'autres, par exemple l'énergie marémotrice ou encore l'énergie thermique des mers, et se développent aujourd'hui plus rapidement grâce aux prouesses techniques et avancées scientifiques.

Toutes ces énergies diffèrent de par leur rendement, c'est-à-dire, le rapport entre le coût et la production, cependant leur développement a pour objectif commun de limiter les coûts relatifs au développement, à l'installation, à la production, à l'entretien, au transport, autrement dit à l'acheminement de l'énergie vers les différentes centrales électriques. Tout ceci est loin d'être négligeable, à cela s'ajoutent les contraintes environnementales, selon les différentes politiques de développement durable.

Le travail portant sur la recherche de sources d'énergies dans le domaine maritime notamment, de nouvelles méthodes de production et le développement de celles-ci ne se poursuit que si elles sont rentables, le but étant de réduire les coûts au maximum. La plus rentable demeurera alors celle qui attirera le plus d'attention par les investisseurs publics et privés, et sera davantage exploitée. La centrale utilisant l'énergie marémotrice (citée précédemment) et permettant d'alimenter 1,5 millions de foyers, chiffre considérable, en est un parfait exemple puisque ce projet fut abandonné au vu des coûts élevés que représentaient l'installation d'une telle centrale (24 milliards d'euros).

D'autre part, l'implication des pays étrangers dans la recherche et le développement des énergies marines renouvelables varient d'un pays à un autre selon leur besoin en énergie, s'ils disposent ou non d'un territoire maritime, en d'autres termes, d'une capacité à développer ce type d'énergie. Néanmoins, l'énergie produite grâce à la mer et à ses courants n'est encore que partiellement exploitée et qui sait ? Peut-être découvrira-t-on encore un nouveau moyen de produire de l'énergie ?

La rédaction d'un tel rapport sur un projet aussi intéressant que sont les énergies marines renouvelables n'a été rendu possible que grâce à une parfaite organisation, cohésion et communication au sein du groupe. C'est pourquoi nous faisons un bilan à chaque fin de séance de TD afin de suivre l'avancée du projet et son bon déroulement. Entre chaque séance, chacun travaillait de son côté sur sa partie mais nous avons mis en place une discussion de groupe instantanée ce qui nous permettait d'échanger et communiquer sur nos différentes idées plus facilement.

Nous avons apprécié travailler sur un tel sujet qui fut une première pour la plupart d'entre nous. En effet, l'étude de celui-ci nous a aidé à mieux comprendre comment notre société actuelle cherche à relever de nouveaux défis scientifiques tels que la recherche et le développement de

nouvelles sources d'énergies. Pour chacun d'entre nous, ce sujet auquel nous nous étions intéressés s'est avéré plus qu'enrichissant. Nous tenons à remercier notre tuteur M. Dany Vandromme, qui nous a suivis tout au long de la rédaction de notre rapport, guidés pendant chaque séance et qui nous a fournis les documents nécessaires afin d'enrichir et compléter nos recherches. Pour finir, cette étude nous a permis de développer notre capacité à travailler en équipe avec des personnes que nous ne connaissions pas, à organiser notre emploi du temps et exploiter les compétences de chacun afin de mener à bien notre projet physique.

Afin d'améliorer celui-ci, nous aurions pu, si nous en avions les capacités, visiter une centrale marémotrice par exemple, nous permettant par la même occasion de nous plonger de manière plus concrète dans notre sujet, découvrir son fonctionnement dans des conditions réelles, autrement dit, son exploitation ainsi que la manière dont l'énergie est redistribuée par la suite.

Bibliographie

Partie contexte actuel :

<http://www.arbitrage-maritime.org/fr/Gazette/G38complement/annelapierre.pdf>

Une hydrolienne de Paimpol en réparation, Le figaro

<http://www.enr.fr/editorial/65/Les-enjeux-pour-la-France>

http://www.lemonde.fr/planete/article/2016/02/04/la-france-aggrave-son-retard-dans-les-energies-renouvelables_4859689_3244.html

http://www.lemonde.fr/planete/article/2017/01/31/eclaircie-pour-les-energies-renouvelables-en-france_5071942_3244.html

http://www.lemonde.fr/energies/article/2016/06/01/2015-annee-record-pour-les-energies-renouvelables-dans-le-monde_4929916_1653054.html

<http://www.connaissancedesenergies.org/etat-des-lieux-du-marche-de-leolien-offshore-160316>

http://www.lemonde.fr/energies/article/2016/05/31/eoliennes-hydroliennes-ou-en-sont-les-energies-marines-en-france_4929642_1653054.html#00lpCqKpwwaOjzVw.99

<http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/html/inventaire/Fr/sommaire.asp>

<http://www.lemarin.fr/secteurs-activites/energies-marines/23939-emr-les-laureats-de-lappel-projets-pour-la-transition>

<http://www.agence-nationale-recherche.fr/fileadmin/aap/2016/selection/ia-emr-selection-2016.pdf>

Partie énergie houlomotrice :

<http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-houlomotrice-ou-energie-des-vagues>

<http://energiebleue.e-monsite.com/pages/i-definition-et-potentiel.html>

<http://wavepower.ek.la/pelamis-p488823>

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Bathym%C3%A9trie>

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Houle>

<http://tpeenergiedelamer.blogspot.fr/p/houlomotrice.html>

https://en.wikipedia.org/wiki/Oyster_wave_energy_converter#History

<http://mtaterre.fr/dossiers/comment-ca-marche-les-energies-marines/lenergie-houlomotrice-recuperer-lenergie-des-vagues>

<http://ehoulomotrice.canalblog.com/>

<http://wavepower.ek.la/limpet-p522755>

<http://www.arbitrage-maritime.org/fr/Gazette/G38complement/annelapierre.pdf>

<http://www.enr.fr/editorial/65/Les-enjeux-pour-la-France>

http://www.lemonde.fr/planete/article/2016/02/04/la-france-aggrave-son-retard-dans-les-energies-renouvelables_4859689_3244.html

http://www.lemonde.fr/planete/article/2017/01/31/eclaircie-pour-les-energies-renouvelables-en-france_5071942_3244.html

http://www.lemonde.fr/energies/article/2016/06/01/2015-annee-record-pour-les-energies-renouvelables-dans-le-monde_4929916_1653054.html

<http://www.connaissancedesenergies.org/etat-des-lieux-du-marche-de-leolien-offshore-160316>

http://www.lemonde.fr/energies/article/2016/05/31/eoliennes-hydroliennes-ou-en-sont-les-energies-marines-en-france_4929642_1653054.html#00lpCqKpwwaOjzVw.99

<http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/html/inventaire/Fr/sommaire.asp>

<http://www.lemarin.fr/secteurs-activites/energies-marines/23939-emr-les-laureats-de-lappel-projets-pour-la-transition>

<http://www.agence-nationale-recherche.fr/fileadmin/aap/2016/selection/ia-emr-selection-2016.pdf>

Partie énergie hydrolienne :

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Hydrolienne>

http://www.ecosources.info/dossiers/Hydrolienne_eolienne_sous-marine

<http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/hydroliennes>

<https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/le-fonctionnement-d-une-hydrolienne>

<http://pierre.hautefeuille.free.fr/TPE/EnergieCourants.htm>

http://www.liberation.fr/futurs/2017/04/05/l-hydrolien-n-avance-qu-a-tout-petits-pas_1560658

<http://www.eel-energy.fr/fr/>

Partie énergie osmotique :

<http://www.france-energies-marines.org/Les-energies-marines-renouvelables/L-energie-osmotique>

<https://www.lenergieenquestions.fr/energie-marine-quest-ce-que-lenergie-osmotique/>

<http://www.cleantechrepublic.com/2011/07/04/norvege-premier-pays-experimenter-energie-osmotique/>

<http://www.usinenouvelle.com/article/production-electrique-une-centrale-osmotique-de-40-nanometres.N192719>

<https://www.energystream-wavestone.com/2013/03/lenergie-osmotique-entre-t-elle-dans-une-nouvelle-ere/>

<http://www.sur-la-plage.com/articles/l-energie-osmotique-une-histoire-de-sel-et-d-eau-222.php>

<http://www.faiteslepleindavenir.com/2010/04/08/losmose-pour-produire-de-lelectricite/>

Partie énergie thermique des mers :

<http://energie-thermique-des-mers-tpe.e-monsite.com/pages/perspectives-d-avenir-et-projets-en-cours.html>

<https://www.lenergieenquestions.fr/les-couts-de-production-des-differentes-sources-denergie-en-france-infographie/>

http://www.rte-france.com/sites/default/files/panorama_enr20170522.pdf

<http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/energies-th4/#downloads>

<http://fr.dcnsgroup.com>

<https://www.actu-environnement.com>

http://www.ecosources.info/dossiers/Centrale_OTEC_oceanothermie

<https://www.youtube.com/watch?v=NWBhllnH9I8>

https://www.youtube.com/watch?v=gnqvoJBRF_s

<https://www.youtube.com/watch?v=Z88R5P-ARRY>

<http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-thermique-des-mers-etm>

Partie énergie marémotrice:

<http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-maremotrice>

<https://www.shf-lhb.org/articles/lhb/pdf/1997/02/lhb1997008.pdf>

<https://www.youtube.com/watch?v=jNXiwcZYMpU>

<https://www.youtube.com/watch?v=gn3bCGKNosk>

<https://www.youtube.com/watch?v=-wAkF4QILOo>

<https://www.edf.fr/groupe-edf/producteur-industriel/energies-renouvelables/energies-marines/energie-des-marees>

http://www.ecosources.info/dossiers/Usine_maremotrice

<https://www.edf.fr/groupe-edf/producteur-industriel/energies-renouvelables/hydraulique/edf-hydraulique-bretagne-normandie/l-usine-maremotrice-de-la-rance/decouvrir-et-comprendre>

<https://www.gralon.net/articles/commerce-et-societe/industrie/article-l-energie-maremotrice---presentation-et-fonctionnement-3013.html>

<https://www.lenergieenquestions.fr/tag/energie-maremotrice/>

<http://www.mtaterre.fr/dossiers/comment-ca-marche-les-energies-marines/une-energie-marine-bien-developpee-lenergie-des>