



M2 Génie de l'Habitat
Année 2009

Projet Mécanique des Fluides



Université
Paul Sabatier

TOULOUSE III

Energie Houlomotrice

Arexis Lydie
Gilles Gabriel
Lambin Faustine

Magne Emmanuel
Nohile Loic
Picard Bastien



Sommaire

| | |
|---|-------------|
| INTRODUCTION | p 3 |
| <i>1°- <u>L'électricité provenant de la mer</u></i> | |
| <i>2°- <u>L'énergie houlomotrice</u></i> | |
| I- Centrale à colonne d'eau oscillante | p 6 |
| <i>1°- <u>Principe de fonctionnement</u></i> | |
| <i>2°- <u>Puissance et lieu d'implantation</u></i> | |
| <i>3°- <u>Un exemple concret ; le LIMPET500</u></i> | |
| <i>4°- <u>Avantages et inconvénients</u></i> | |
| <i>5°- <u>Conclusion</u></i> | |
| II- Système à flotteurs en surface ou semi immergés | p 11 |
| <i>1°- <u>Le SEAREV</u></i> | <i>p 12</i> |
| <i>2°- <u>Le Système Pélamis</u></i> | <i>p 16</i> |
| III- Système Archimedes wave swing | p 18 |
| <i>1°- <u>Appareillage</u></i> | |
| <i>2°- <u>Principe de fonctionnement</u></i> | |
| <i>3°- <u>Avantages</u></i> | |
| <i>4°- <u>Performances</u></i> | |
| <i>5°- <u>Conditions d'installation</u></i> | |
| IV- Systèmes à déferlement | p 21 |
| <i>1°- <u>Les systèmes à déferlement situés sur les côtes</u></i> | |
| <i>a) <u>le Tapchan</u></i> | |
| <i>b) <u>Seawave Slot-cone Generator</u></i> | |
| <i>2°- <u>Les systèmes à déferlement en mer(exemple : Wave dragon)</u></i> | |
| CONCLUSION | p 24 |
| <i>1°- <u>Contexte :</u></i> | <i>p 24</i> |
| <i>2°- <u>Différents pays misent fortement sur l'énergie houlomotrice</u></i> | <i>p 24</i> |
| <i>3°- <u>Enjeu financier</u></i> | <i>p 25</i> |
| <i>4°- <u>Impacts directs</u></i> | <i>p 26</i> |
| Bibliographie/Webographie | p 27 |
| EN ANNEXE : Echelle de Beaufort | |

Introduction

1°- L'électricité provenant de la mer

Historique

L'attrait de l'électricité d'origine marine ne date pas d'hier.

En effet, il existait déjà une usine marémotrice en Bretagne (à Rance près de Saint-Malo) en 1966 qui grâce à des turbines produit de l'électricité.

De nos jours, les chercheurs tendent plutôt à créer de petites unités de production pouvant être installées à quelques kilomètres des côtes.

Suite aux problèmes actuels concernant l'environnement et les hausses successives du coût des énergies fossiles les projets permettant d'exploiter l'énergie houlomotrice sont en plein développement. Et grâce aux nouvelles technologies les machines élaborées sont de plus en plus performantes et résistantes.

Differentes techniques :

Plusieurs techniques ont été explorées pour tirer de la mer et de ses mouvements de l'énergie :

- **récupérer la force des marées** comme cela avait été le cas dans l'usine marémotrice de la Rance
- **récupérer l'énergie des courants sous-marins** grâce à des hydroliennes (l'équivalent des éoliennes pour de l'eau au lieu de l'air)
- **d'exploiter les différences de température entre l'eau de surface et l'eau profonde** par des pompes à chaleur
- **récupérer l'énergie des vagues** grâce à des machines houlomotrices qui ont pris une certaine avance sur les autres possibilités de récupération d'énergie.

A noter :

- **1ere Conférence Internationale sur les Energies Renouvelables Marines** a eu lieu aux Etats-Unis, à New York les **17 et 18 avril 2008**.
- Et en France, la deuxième **conférence internationale sur les énergies marines renouvelables** (ICOE 2008 pour International Conference on Ocean Energy <http://www.icoe2008.com>), « de l'innovation à l'industrie », a eu lieu **du 15 au 17 octobre 2008, au Quartz Congrès de Brest**, organisée par EDF et l'Ifremer (Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer) en partenariat avec l'Association Européenne des Energies Marines (EU-OEA) et le Groupe Energies Marines de l'Agence Internationale de l'Energie (IEA-OES).

Ces conférences visent à réunir les acteurs des énergies marines, industriels, scientifiques, usagers de la mer ainsi que les acteurs institutionnels et politiques, en intégrant fortement des axes prioritaires de R&D dont la connaissance des impacts et les enjeux socio-économiques, ainsi que les contextes régionaux, nationaux, européen et mondial.

2•- L'énergie houlomotrice

Définition de la houle

La houle est un ensemble de vagues enclenchées sur des dizaines voire des centaines de kilomètres. Elle est définie par sa direction (Est, Ouest, ...) et sa hauteur (en mètre). Elle se forme au milieu de l'océan ou de la mer suite à un conflit de masses d'air. Ceci entraîne alors la formation d'une dépression avec le plus souvent création de rafales de vent à la surface de l'eau. La houle est alors formée.

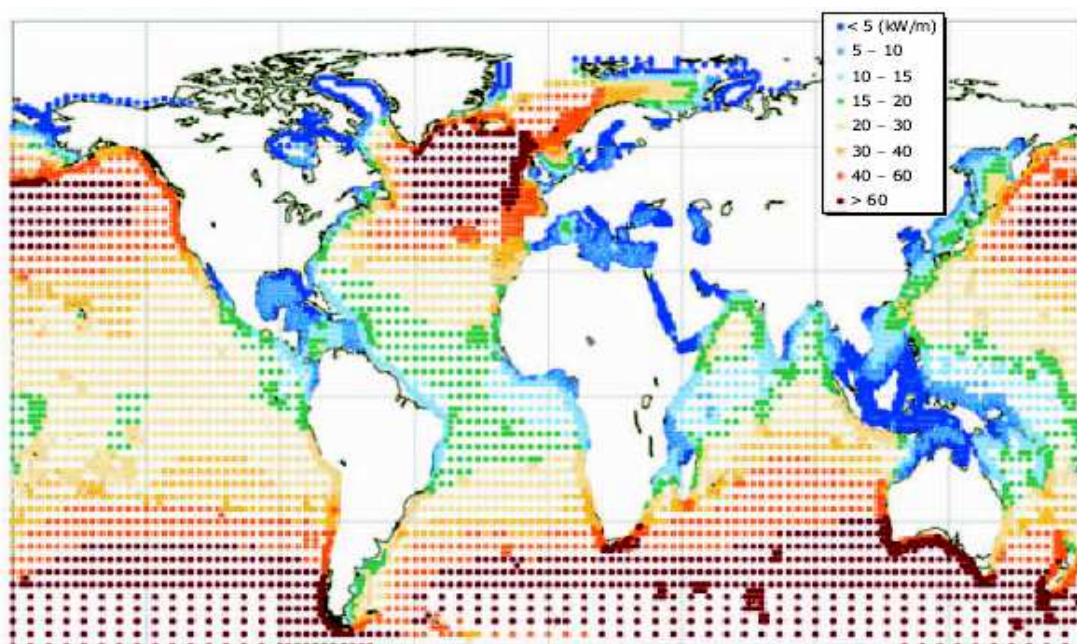
La taille de la houle dépend de la profondeur de l'eau : plus il y a de profondeur, plus la houle pourra être grande.

Mesure de la houle par l'échelle de Douglas

| Échelle | Houle | État de la mer |
|---------|-----------------------|----------------|
| 0 | aucune | calme |
| 1 | plus de 10 cm | ridée |
| 2 | entre 10 et 50 cm | belle |
| 3 | entre 50 cm et 1,25 m | peu agitée |
| 4 | entre 1,25 m et 2,5 m | agitée |
| 5 | entre 2,5 m et 4 m | forte |
| 6 | entre 4 m et 6 m | très forte |
| 7 | entre 6 m et 9 m | grosse |
| 8 | entre 9 m et 14 m | très grosse |
| 9 | supérieur à 14 m | énorme |

Remarque : L'Echelle de Beaufort quant à elle permet de déterminer la vitesse moyenne du vent et de ce fait de prévoir la houle. (Cf. annexe)

Distribution mondiale de la ressource énergétique moyenne de la houle



Remarque : la houle se déplace en moyenne à une vitesse de 30 km / h .

Définitions de l'énergie houlomotrice

L'énergie houlomotrice désigne une énergie mécanique composée d'une énergie cinétique (vitesse des particules d'eau) et d'une énergie potentielle liée au déplacement de la surface de la mer sous l'action de la houle (ou déformation de la surface de l'eau).

Une partie de cette énergie peut-être récupérée grâce à différents dispositifs : flotteurs et radeaux oscillants, cloches à compression ou dépression, ...

Mesurer l'énergie de la houle E :

$$E = (1/8) \rho g H^2$$

Avec :
p : masse volumique de l'eau.
g : intensité du champ de pesanteur .
H : hauteur des vagues.

Intéressons nous maintenant à divers prototypes permettant de transformer l'énergie houlomotrice.

I- Centrale à colonne d'eau oscillante

L'une des premières utilisations de l'énergie de la houle a été celle d'unités de production d'électricité utilisant la méthode dites « à colonne d'eau oscillante ». Il s'agit de petites centrales électriques construites sur les côtes de pays où la houle côtière est assez importante. Nous allons maintenant étudier plus en détail ce type d'installation.

1°- Principe de fonctionnement

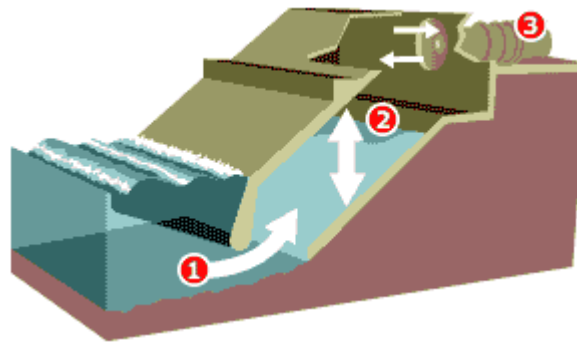


Figure n°1: vue en coupe d'une centrale à colonne d'eau oscillante

Le principe en lui-même est relativement simple: la houle (voir 1 fig.1) fait augmenter la hauteur d'eau dans une colonne en béton fixé sur le rivage (voir 2 fig.1). Cette brusque montée d'eau va réduire le volume de la cavité et donc comprimer l'air qui se situe dedans. Cet air n'aura d'autre choix que d'être évacué sous pression en haut de la colonne au travers d'une turbine couplée à un générateur (voir 3 fig.1). La turbine sera mise en rotation par le flux d'air comprimé. Une fois l'amplitude maximale de la vague atteinte, celle-ci redescend et provoque un appel d'air dans la colonne. Cette fois-ci, l'air entre avec force dans la colonne dans l'autre sens et fait tourner de nouveau la turbine. Cela produit de l'électricité. Il est à noter que quelque soit la direction du flux d'air (entrée ou sortie de la colonne), la turbine tournera toujours dans le même sens garantissant une production constante d'électricité. (voir fig.2)

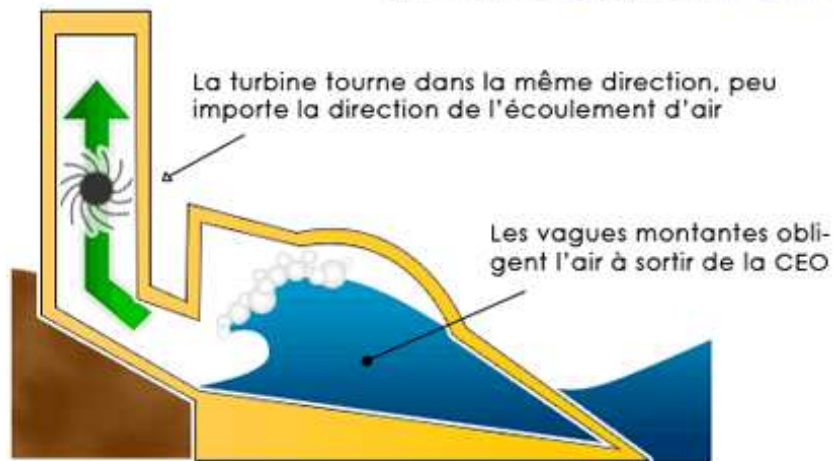


Figure n°2: schéma de principe du va et vient de la houle dans la colonne

2°-Puissance et lieu d'implantation

Nous avons vu précédemment la nécessité de la houle pour comprimer le volume d'air de la colonne. Il faut savoir que la houle se caractérise par la hauteur de houle H (dénivellation maximale entre une crête et un creux successif) ainsi que la période déterminé par la longueur d'onde L de la houle. (voir fig.3) Ces deux termes vont permettre de calculer la puissance théorique contenue dans la houle (en kW/m).

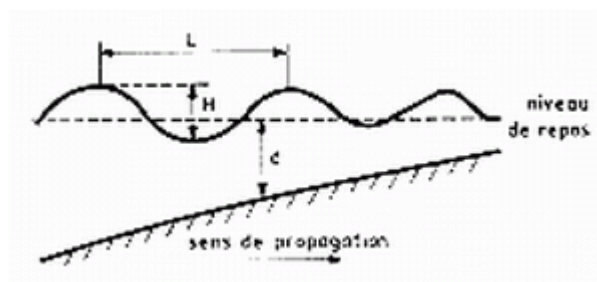


Figure n°3: représentation schématique de la houle

Calcul théorique:

L'onde de la houle peut être considérée comme une sinusoïde. Nous allons donc représenter sa période:

$$T = \sqrt{\frac{2\pi\lambda}{g}}$$

avec « λ » la longueur d'onde de la houle
et « g » la force de gravité.

La puissance contenue dans la houle est fonction de l'amplitude de ses vagues. On la détermine suivant cette expression:

$$P = \frac{\rho \cdot g^2 \cdot a^2 \cdot T}{8\pi} \quad (\text{en kW/m}) \quad \text{avec « } a \text{ » l'amplitude de la vague, égal à } H/2$$

On observe donc que l'amplitude de la houle ainsi que sa longueur d'onde sont prépondérants pour déterminer l'énergie potentiellement récupérable. Or, ces facteurs dépendent de la qualité des fonds marins, de la puissance du vent en mer, ainsi que de l'espace nécessaire au développement d'une houle à forte période. Chaque côte aura donc un potentiel énergétique différent et plus ou moins exploitable. Aussi, certaines côtes, telles que celles d'Irlande, sont plus favorables à l'exploitation d'usine à colonne oscillante (voir fig.4) du fait d'une amplitude de vague très élevée.

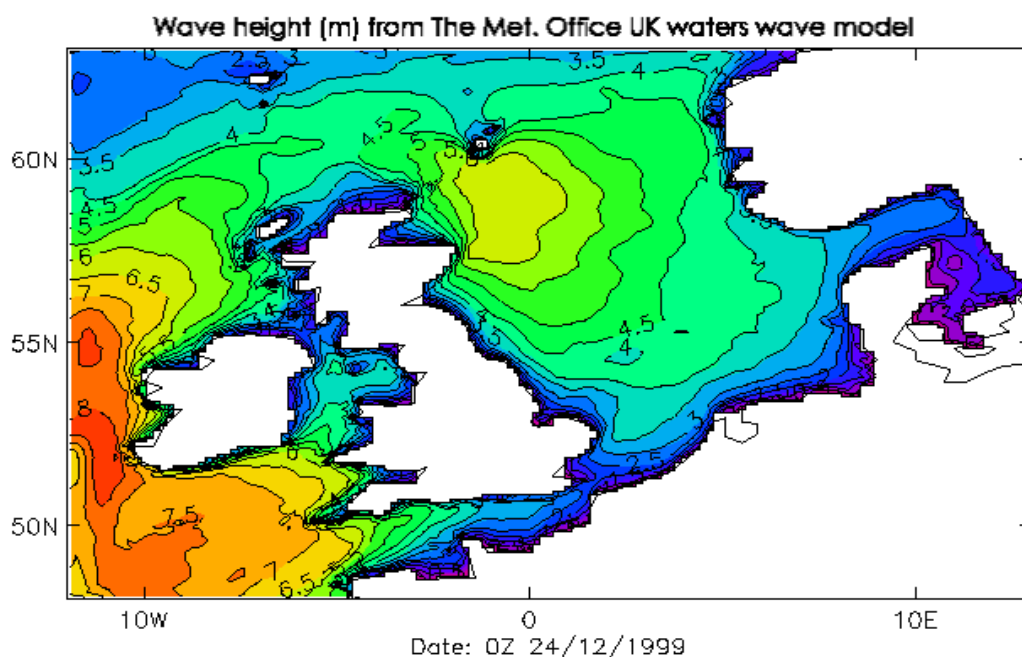


Figure n°4: planisphère d'amplitude de la houle

3°-Un exemple concret ; le LIMPET500

Le LIMPET500 , ou « Land Installed Marine Powered Energy Transformer », est une usine électrique de 0.5 MW construite sur l'île d'Islay en Écosse, utilisant le principe de la colonne d'eau oscillante où une première unité de 75kW avait été construite afin de développer et tester cette technologie. (voir fig.5et6). Il s'agit de la première utilisation commerciale d'une unité de production de ce type. L'électricité produite est en effet injecté sur le réseau national. L'énergie produite correspond à la demande de l'île. Il s'agit donc d'un bon exemple de production électrique pour la consommation locale.



Figure n°5: turbine de l'IMPET 500



Figure n°6: massif en béton comprenant la colonne et la centrale

4°-Avantages et inconvénients

- **inconvénients**

L'inconvénient majeur, pour le développement de cette méthode de production électrique est l'investissement financier des compagnies. En effet, comme nous l'avons vu précédemment, à ce jour, seule une unité de production de type « colonne d'eau oscillante » est opérationnelle. Le manque de connaissances et de retours d'informations ne sont pas en faveur de cette méthode, contrairement à d'autres sources d'énergie renouvelable comme le vent ou le soleil au travers des éoliennes ou des panneaux photovoltaïques, déjà éprouvés.

Socialement, ce type de centrale peut ne pas être bien perçue, notamment si elles sont construites proche d'habitations. En effet, le bruit de la turbine est strident et très incommodant. Elles peuvent aussi nuire à la pêche ainsi qu'à la faune locale du fait de la grande emprise de terrain et de côte qui sont nécessaires à son fonctionnement.

Enfin, il faut une houle forte et régulière pour un bon fonctionnement, ce qui réduit les côtes potentiellement aptes à recevoir ce type de centrale qui, de plus, ne sont pas propices à une production élevée d'électricité.

- **Avantages**

Le principal avantage est évidemment de produire de l'électricité à partir d'une ressource jusqu'ici inutilisée et gratuite: la houle. La houle est un réservoir infini d'énergie ce qui permet de la définir comme énergie renouvelable.

Malgré la nécessité d'une houle régulière et forte, la technologie dites « de la colonne d'eau oscillante » est virtuellement exploitable sur toutes les côtes du monde.

La quantité réduite d'électricité produite est un avantage si ce type d'usine est utilisée pour la production d'électricité d'îles ou de régions peu demandeuse. Cela peut être une alternative très intéressante aux petites centrales au charbon ou au fioul.

Enfin, afin de limiter les dégât sur les côtes et surtout pour augmenter les rendements, cette technologie est transposable en off-shore, là où la houle est plus forte.(voir fig.7)



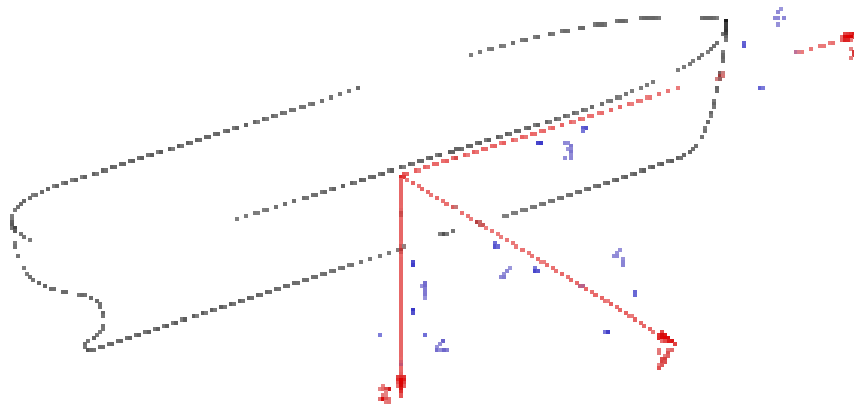
Figure n°7: centrale à colonne d'eau oscillante Off-Shore

5°-Conclusion

L'énergie de la houle, au travers d'unités de production électrique à colonne d'eau oscillante jouera un rôle important dans un objectif à long terme d'une plus grande utilisation d'énergie renouvelable. Cette technologie qui à l'heure actuelle ne fournit en électricité que des petites îles, verra son développement progresser et s'améliorer pour enfin devenir viable et compétitive. Actuellement, seules l'Écosse et le Japon semblent lancés dans cette direction, la France quant à elle, n'ayant aucun programme actif sur cette technologie, ne semble pas diriger sa production d'énergie renouvelables dans cette direction.

II- Système à flotteurs en surface ou semi immergés

Il existe différents procédés de conversion de l'énergie des vagues basés sur le concept d'un corps flottant actionné par la houle. En effet, la houle étant plus énergétique en grande profondeur d'eau, les flotteurs sont amarrés sur un site au large des côtes dans des profondeurs pouvant aller de 30 à 100 m d'eau. Les flotteurs sont excités en mouvement mécanique par les vagues. Chaque flotteur favorise la récupération d'énergie mécanique à travers les degrés de liberté qu'il autorise :



- 1- Pilonnement
- 2- Embardée
- 3- Cavalement
- 4- Lacet
- 5- Tangage
- 6- Roulis

Ces mouvements sont ensuite convertis en énergie secondaire : hydraulique, pneumatique ou électrique, à travers des convertisseurs d'énergie nommés Power Take Off. L'un des concepts de flotteur les plus répandus est celui de la bouée pilonnante. Plusieurs systèmes sont basés sur le principe d'une bouée amarrée avec comme degré de liberté le mouvement vertical (mouvement de pilonnement). D'autres concepts de flotteurs utilisent d'autres degrés de liberté que le mouvement vertical du pilonnement. Le système Pelamis en est un exemple intéressant.

1°- Le SEAREV

Le SEAREV est un système destiné à la récupérer et à la transformer en électricité. Imaginé il y a quelques années par des ingénieurs du CNRS, le projet SAEREV (Système Electrique Autonome de Récupération de l'Energie des Vagues) a été proposé comme moyen de production énergétique à grande échelle.

Les premiers tests effectués à l'aide de prototypes miniatures se sont révélés concluants, et la mise en service d'une première ferme houlomotrice de ses appareils devrait voir le jour d'ici là à 2009, non loin de l'île d'Yeu près de Nantes. Des contrats de fabrication en chaîne de ces petits bijoux prometteurs sont déjà prévus en cas de réussite du projet et de rendements importants avérés.

Chaque unité, qui mesurera entre 12 et 15 mètres de haut pour 1000 tonnes, sera à même de fournir de l'électricité pour 200 à 250 foyers.

Principe de fonctionnement :

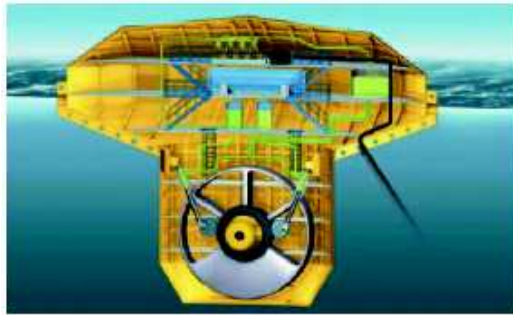


Figure 8: principe du SEAREV

Il est composé simplement d'un flotteur fermé hermétiquement à l'intérieur duquel est accrochée une masse mobile (roue pendulaire de 500 tonnes. cf. Figure 8). Le flotteur est mis en mouvement par les vagues, la masse oscille avec son mouvement propre, et le mouvement relatif existant entre ces deux corps est transformé en électricité par l'intermédiaire d'un convertisseur d'énergie, contenu dans le flotteur.

Ainsi, le SEAREV offre de nombreux avantages :

Le système présente ainsi de nombreux avantages :

- toutes les parties mobiles sont contenues dans la coque du flotteur, et sont donc protégées des agressions du milieu marin. Ainsi, les coûts de maintenance du SEAREV et les risques de panne sont minimisés par rapport à un système dont les parties mobiles sont en contact avec l'océan ;
- la masse mobile est en pratique un grand cylindre dont le centre de gravité est décentré. Dans la conception du système, il est prévu que ce cylindre puisse faire des tours sur lui-même sans restriction. Le système ne présentant ainsi pas de butées, il est particulièrement résistant dans les mers extrêmes et en cas de très grandes vagues ;
- le système n'a pas besoin de référence externe, puisque il embarque sa propre référence, la gravité, à travers le cylindre qui se comporte mécaniquement comme un pendule. Il ne nécessite donc qu'un ancrage souple et léger, moins coûteux qu'un système d'ancrage tendu.

La solution hydro-pneumatique :

Deux solutions techniques pour le système de conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique sont envisagées à l'heure actuelle. La première est une solution hydro-pneumatique, dans laquelle le cylindre est utilisé pour actionner des vérins hydrauliques qui pompent de l'huile à partir d'un réservoir basse pression dans des accumulateurs pneumatiques. Pendant que le piston de gauche remonte, celui de droite descend, libérant ainsi de la place dans le

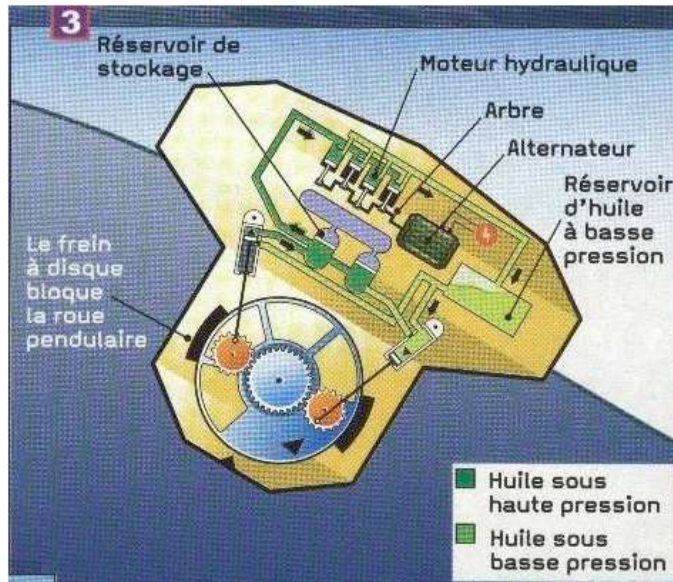


Figure 9 : montée du piston gauche

cylindre. Par l'aspiration provoquée par la création de ce vide, de l'huile contenue dans le réservoir dépressurisé entre dans ce cylindre. Elle sera renvoyée vers le moteur hydraulique à la prochaine rotation de la roue pendulaire, lors de l'oscillation dans l'autre sens du bâtiment. Le moteur hydraulique (à cylindrée variable) est couplée à une génératrice électrique. L'électricité ainsi générée passe ensuite par un étage d'électronique de puissance, comprenant notamment un transformateur électrique, puis est envoyée à terre sur le réseau électrique par l'intermédiaire d'un câble sous-marin.

Nota bene : afin d'éviter la destruction des pistons par des mouvements trop brusques ou trop amples de la roue pendulaire en cas de forte houle, cette dernière est maîtrisée par un frein à disque contrôlé par un ordinateur qui calcule en permanence la position de la roue.

Le principal avantage de ce système de conversion de l'énergie est d'assurer une fonction de lissage et stockage de la puissance produite. Cette solution est également bien adaptée à la problématique énergie des vagues, dans laquelle la puissance est transmise à travers des efforts importants et des vitesses faibles.

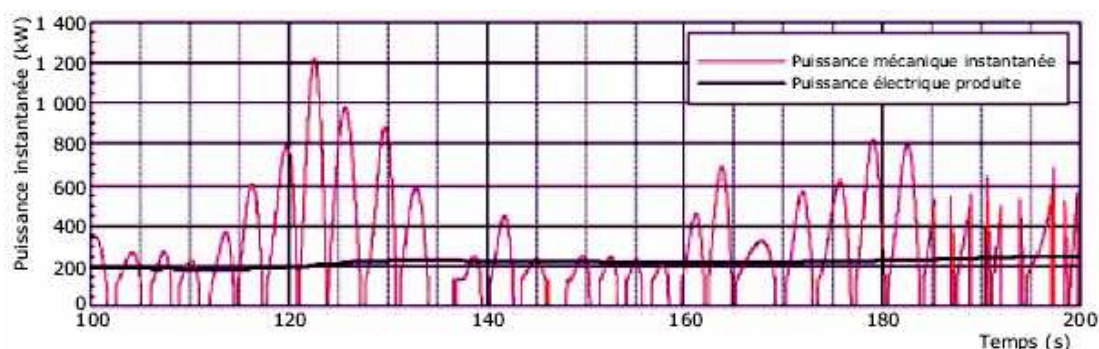


Figure 10: puissance instantanée et puissance produite

Limites :

Cependant, elle ajoute un étage dans le chaîne de conversion de l'énergie, dans le sens où l'énergie des vagues est transformée d'abord en énergie mécanique, puis en énergie pneumatique, et enfin en énergie électrique. Il en résulte une cascade de rendements qui peuvent diminuer considérablement le total de l'énergie produite. Une solution hydraulique nécessite également une maintenance importante, source de coût non négligeable, spécialement lorsqu'il s'agit d'un module en mer.

La solution électrique directe :

Pour tenter de remédier à tous ces défauts, il est également envisagé une solution électrique directe, dans laquelle on vient accoupler directement une génératrice électrique. L'avantage se situe à présent au niveau rendement, très bon, et maintenance, très faible. Par contre, il n'existe pas à l'heure actuelle de génératrice standard pour une telle application, et elle constitue en elle-même un sujet de recherche. Avec cette solution, il reste également à traiter le problème du lissage de l'énergie.

D'autre part, les systèmes de récupération de l'énergie des vagues sont destinés à être déployés en fermes, comme les éoliennes (Figure 11). La dispersion spatiale des systèmes induit un effet de lissage sur la production d'électricité globale de la ferme qui permet de diminuer de manière importante les besoins en terme de stockage de l'énergie. Les performances du SEAREV concernant la récupération d'énergie vont être bonnes pour des houles de période proche des périodes de résonance, puisque que pour ces périodes on obtiendra une réponse importante du système en terme d'amplitude. Malheureusement, les vagues sont un phénomène dont la période et la hauteur varient continuellement et il est donc important de prévoir des moyens de contrôle capables d'adapter la dynamique du système aux vagues rencontrées.



Figure 11 : ferme de SEAREV

Pour le SEAREV, on a donc adopté un type de contrôle suboptimal discret connu sous le nom de contrôle par latching. Ce contrôle, consiste à bloquer le pendule en position lorsque sa vitesse relative s'annule et à le relâcher quelques instants plus tard, lorsque la phase de la houle est plus favorable. On provoque par ce moyen des résonances paramétriques dans la dynamique du système, qui permettent d'amplifier considérablement les mouvements, et donc la production d'énergie. De plus, puisque l'on bloque le pendule à vitesse nulle, la dépense d'énergie nécessaire pour appliquer le contrôle est minimale (à l'image du frein à main d'une voiture).

La figure 12 met en évidence le potentiel de ce contrôle par latching appliqué au SEAREV. On a ainsi porté une simulation numérique du mouvement du système en houle régulière avec et sans contrôle. Sur cet exemple, le contrôle par latching est mis en route à $t = 360$ s. On constate l'amplification du mouvement qui en résulte, et l'accroissement de l'absorption d'énergie.

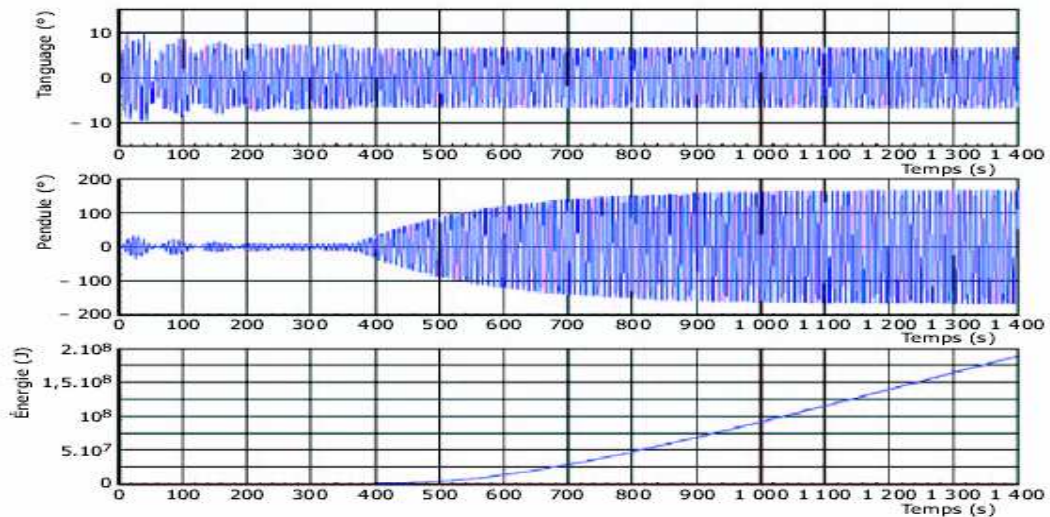


Figure 12 : Enregistrements temporels du mouvement de tangage, du mouvement du pendule, et de l'énergie

La production d'énergie de ce type de système est, on l'a vu, étroitement lié à sa réponse à la houle incidente. Or, les paramètres dont dépend la réponse du SEAREV sont, bien évidemment, l'ensemble des paramètres mécaniques, tels que la masse du flotteur, la masse de la roue pendulaire, qui sont des variables à prendre en compte. Mais la forme de la coque du SEAREV est également fondamentale, car c'est à travers les interactions fluide-structure que le système est excité. Il sera nécessaire de faire une optimisation multicritères.

La figure 13 présente à titre d'exemple le résultat d'une telle optimisation. En abscisse figure le déplacement du système et en ordonnée l'énergie produite. Par rapport à nos objectifs, les individus les plus performants sont ceux qui minimisent le déplacement tout en maximisant la production, donc ceux situés le plus en haut à gauche sur cette figure. Or, nous observons qu'il ne se dégage pas un individu en particulier dans cette zone, mais plutôt qu'il existe une frontière au-delà de laquelle il n'existe pas d'individu. Cette frontière est connue sous le nom de frontière de Pareto, et elle constitue l'ensemble des individus optimaux au sens des critères de l'optimisation que l'on s'est donnés. Ainsi, un individu appartient au front de Pareto si l'un de ses critères ne peut être amélioré sans en dégrader un autre. De nombreuses recherches sont engagées dans ce but là.

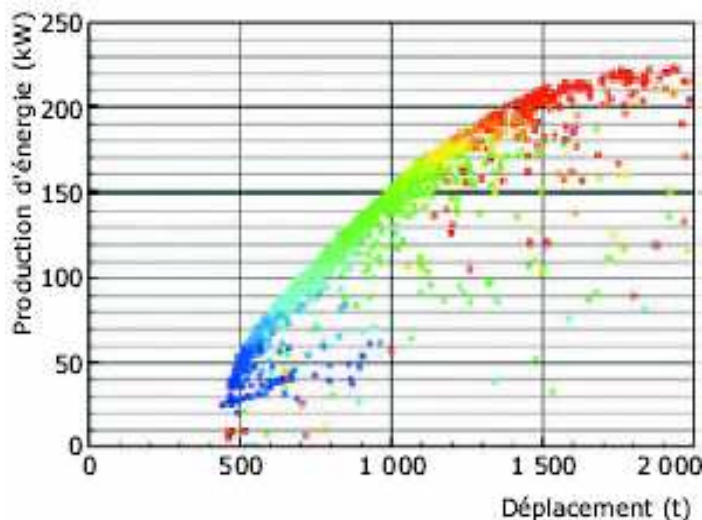


Figure 13 : résultats de l'optimisation multicritère

2° - Le Système Pélamis

Les systèmes de 2nde génération (contrairement aux systèmes de 1^{ère} génération qui sont caractérisés par leurs implantations sur les côtes) sont des installations implantées plus au large avec des profondeurs d'eau de l'ordre de 40 à 100 m, indépendantes de la nature du fond. Ils sont conçus pour survivre aux plus fortes tempêtes et la partie la plus lourde de la maintenance est réalisée en zone abritée moyennant un remorquage.

L'exemple le plus représentatif à ce jour est le Pelamis conçu par la société écossaise « Pelamis Wave Power Ltd » anciennement connu sous le nom de « Ocean Power Delivery Ltd ».

Actuellement un module de 750 kW (puissance maximum, dépendant de la densité de puissance des vagues) est opérationnel. Ce système consiste en un ensemble de 4 segments cylindriques linéaires articulés (longueur totale = 150 m, largeur = 4,7 m), à demi immergés, et liés par des joints (power conversion modules sur la figure 14). Le mouvement des joints généré par les vagues, transversalement et en hauteur, met en mouvement un fluide hydraulique qui fait fonctionner un moteur. Le système Pelamis est positionné parallèlement aux sens de propagation des vagues grâce à son système d'ancrage flexible (« anchors » figure 14) qui force l'avant de l'engin à rester face aux vagues tout en lui laissant assez de mou pour pouvoir se balancer et, donc, produire un maximum d'électricité. Les 3 modules de conversion d'énergie produisent ensemble 750 kW d'électricité, acheminée sur le continent par un câble sous-marin (power cable).



Figure 14 : Principaux éléments du Pelamis

Plusieurs modules peuvent être installés ensemble, comme dans une ferme éolienne. Ainsi une ferme houlomotrice de 30 MW occuperait au plus une surface de 1 km² en mer.



Figure 15 : Pelamis à l'œuvre en mer

Fonctionnement des modules de conversion d'énergie du système Pelamis :

Les mouvements des vagues font jouer les articulations placées entre les tronçons de l'appareil qui ondule autant à la verticale qu'à l'horizontale. Chacune des articulations est pourvue de 4 axes leur permettant de se mouvoir dans toutes les directions au rythme de la houle et des oscillations des vagues. Ce faisant, elles actionnent chacune les pompes à huile auxquelles elles sont reliées et mettent sous haute pression de l'huile contenue dans un grand ballon. L'huile haute pression stockée dans ce grand ballon est ensuite amenée par un conduit dans le moteur hydraulique qui va utiliser cette pression pour faire tourner un arbre de transmission qui entraîne à son tour un alternateur qui produit de l'électricité. Sur le même axe on a un piston qui comprime l'huile et un autre qui aspire l'huile qui a été dépressurisé dans un réservoir situé après le moteur hydraulique.

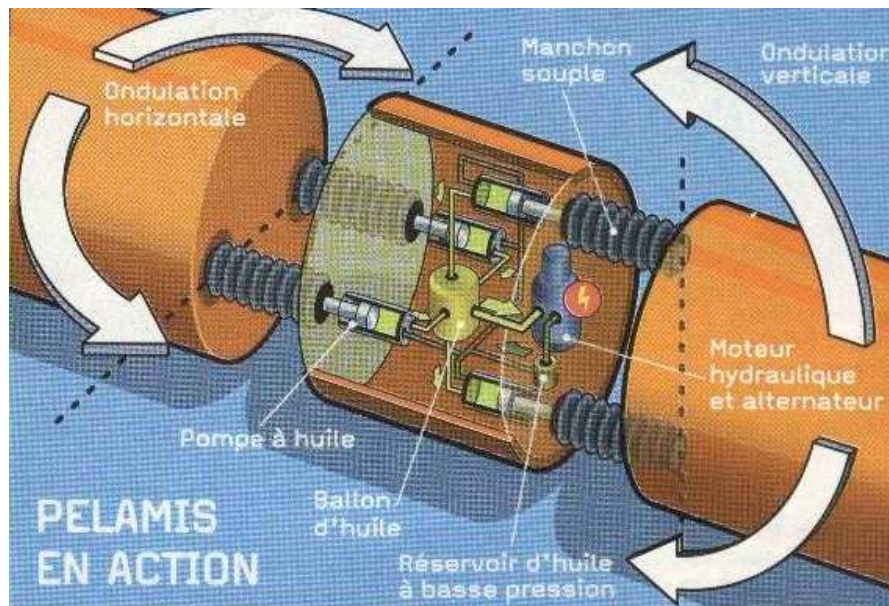


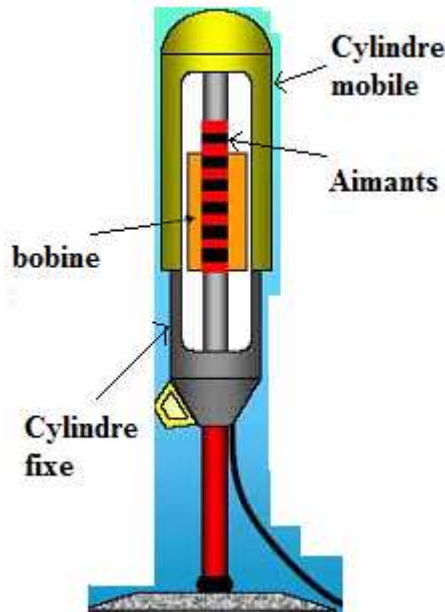
Figure 16 : schéma d'un module de conversion d'énergie

Le principal avantage de ce système hydro-pneumatique est qu'il permet de lisser et stocker la puissance produite par la houle qui est une énergie fluctuante et oscillante. En effet cette fonction de lissage et de stockage est assurée par les accumulateurs pneumatiques, qui sont dimensionnés pour pouvoir absorber les à-coups de production et restituer une puissance stationnaire.

III- Système Archimedes wave swing

1°- Appareillage

L'appareillage du système Archimedes wave swing (AWS) est très simple et ne nécessite pas de technologie très avancée, en effet la seule difficulté vient de la taille et des proportions inhabituelles que doivent prendre les différents composants du système AWS. Le système se compose d'un cylindre hermétique en acier, fixé à un guide vertical lui-même accroché au fond marin. Le cylindre se compose d'un cylindre mobile supérieur ou « flotteur » compris entre 10 et 20m de diamètre, et d'un cylindre fixe inférieur.



A l'intérieur du flotteur on trouve un système de générateur linéaire composé d'une bobine solidaire du cylindre fixe et d'une colonne d'aimants de polarités inverses solidaire du cylindre mobile.

2°- Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement est relativement simple, comme son nom l'indique le système Archimedes wave swing s'appuie sur la poussée d'Archimède, en effet le flotteur est rempli de gaz, généralement de l'air, bien sûr moins dense que l'eau, ce qui implique que la poussée d'Archimède s'appliquant sur le gaz va pousser le flotteur vers le haut. À l'approche de la crête de la vague, la pression de l'eau sur le haut du cylindre augmente et la partie supérieure ou " flotteur " comprime le gaz dans le cylindre pour équilibrer la pression. Le mécanisme inverse se produit au passage du creux de la vague avec une expansion dans le cylindre. Le mouvement relatif entre le flotteur et la partie inférieure ou " silo " est converti en électricité à l'aide d'un système hydraulique et d'un groupe convertisseur. Ce groupe convertisseur composé de la bobine et de la colonne d'aimants va agir de la façon suivante, la colonne d'aimants de polarités différentes étant solidaire du flotteur va donc osciller de bas en haut en suivant la fréquence de la houle au contact de la bobine fixe. L'alternance des aimants polarisés nord ou sud dans la bobine induit un courant électrique récupéré par un réseau de câbles sous-marins.

3° - Avantages

Des évaluations complètes de l'AWS par des tiers ont identifié un certain nombre d'avantages certains par rapport aux autres technologies utilisant l'énergie des vagues. Ces avantages sont résumés ci-dessous :

Durabilité

L'AWS est immergé à une profondeur d'au moins 6m, ce qui lui permet d'éviter les impacts des grosses tempêtes auxquelles sont soumis les autres dispositifs. Ceci réduit les coûts d'amarrage et le risque de dommage.

Puissance Volumique

Avec des prédictions de production atteignant 2MW et des rendements de 25 à 30%, la gamme d'AWS est une option indéniable pour les entreprises électriques cherchant à développer des installations de production de plusieurs MW. La puissance volumique peut être dix fois plus importante que pour les dispositifs flottants par une meilleure utilisation des ressources disponibles.

Simplicité

L'AWS ne comporte qu'une seule pièce mobile et un nombre limité de pièces auxiliaires, ce qui réduit fortement le risque de panne et les besoins de maintenance.

Facilité de maintenance

L'AWS est conçu pour que toutes pièces nécessitant un entretien régulier soient accessibles par submersible téléguidé permettant ainsi des réparations quelles que soient les conditions météorologiques. Ceci signifie donc que l'AWS peut être à nouveau opérationnel en moins de 24 heures alors que des dispositifs en surface peuvent perdre des semaines de fonctionnement.

Environnement

Un autre avantage de cette installation immergée est l'absence d'impact visuel. L'AWS n'est pas équipé d'élément rotatif bruyant. L'impact environnemental est donc négligeable. L'impact visuel est non existant.

Rentabilité

Enfin, le rapport de l'énergie produite par kilogramme d'acier utilisé est plus élevé pour l'AWS que pour ses principaux compétiteurs. Ce rapport, associé aux faibles besoins de maintenance, permet à l'AWS d'obtenir des coûts de production électrique les plus faibles de tous les systèmes de production d'énergie houlomotrice.

4° - Performances

Cette technologie n'est pas encore mature et les chiffres annoncés sur les performances que pourrait atteindre un module, sont compris entre 1 et 5 MW mais la valeur qui semble le plus se rapprocher de la réalité est 2MW



On peut voir ci-dessus la station de production AWS MK I avant immersion, développée par la société AWS ocean energy, immergée au large du Portugal en 2004, on a enregistré une production maximale de 1,5 MW.

5°- Conditions d'installation

L'AWS est un générateur d'électricité de grande puissance utilisé pour la production d'énergie à grande échelle pour un réseau électrique. Son fonctionnement est optimal avec de longues houles. Les besoins spécifiques du site d'installation sont les suivants :

- Une situation exposée à la houle - par exemple la côte ouest des Iles Britanniques, l'Irlande, la France, l'Espagne ou le Portugal
- Une profondeur d'eau de 40 à 100m en dehors des principaux couloirs de navigation commerciale.
- Un réseau électrique garanti à terre
- Un port industriel à moins de 12 heures de navigation
- Un fond marin approprié pour l'installation de câbles vers la côte

IV- Systèmes à déferlement

Dans ces dispositifs, l'eau déferle sur une pente douce pour remplir un ou plusieurs réservoirs situés au dessus du niveau de la mer. L'eau stockée est alors évacuée entraînant dans le même temps une turbine hydraulique reliée à un générateur électrique. Le réservoir joue le rôle de capacité dans laquelle on stockerait de l'énergie potentielle de pesanteur.

Certains dispositifs sont situés sur la côte et subissent l'effet des marées. L'eau stockée est ainsi plus importante à marée haute.

D'autres systèmes sont amarrés en pleine mer, et sont libres de monter et descendre aux rythmes des marées. Ils récupèrent donc l'eau de manière optimale tout au long de la journée et ne sont pas influencés par les marées.

1°- Les systèmes à déferlement situés sur les côtes

a) le Tapchan

Historique

Le « TAPeRed CHANnel » ou Tapchan, qui signifie "canal convergent", est l'une des premières technologies de conversion de l'énergie des vagues à avoir été mise en service en Europe. Construit en 1985 sur la côte Norvégienne, à Toftstallen, d'une puissance de 350 kW, il a fonctionné pendant six ans puis fut arrêté à la suite d'une tempête en 1991.

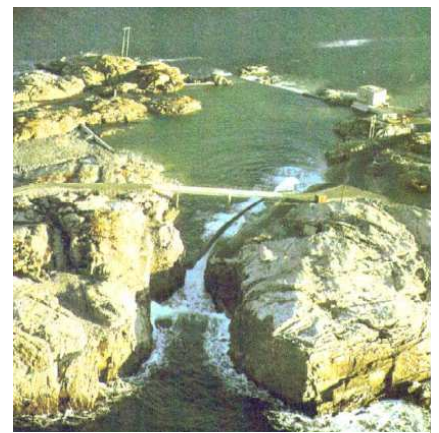


Figure 17 Toftstallen-Norvège

Principe

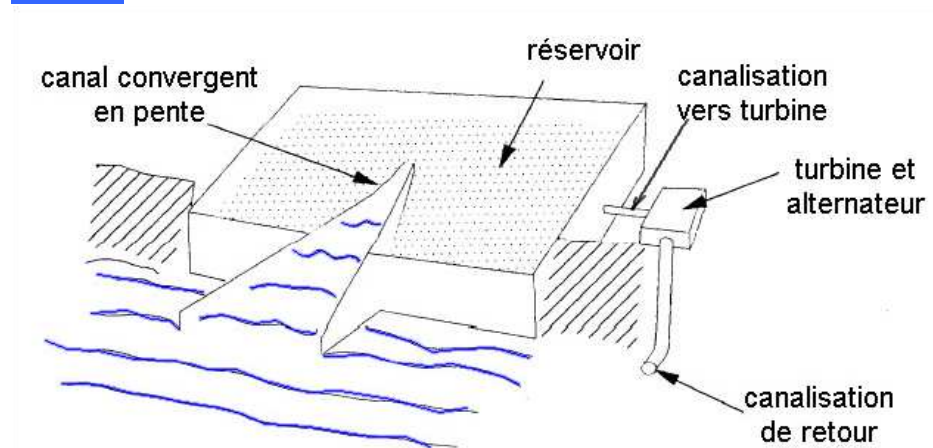


Figure 18 Principe du système à déferlement Tapchan

La forme du canal focalise les vagues incidentes de façon à concentrer l'énergie. Les vagues déferlent dans un réservoir surélevé. L'énergie potentielle initialement contenu dans les vagues est ainsi piégée et est transformée en électricité en passant dans une turbine de type Kaplan.

Remarque : Une turbine Kaplan est une turbine hydraulique. Elles conviennent particulièrement aux faibles hauteurs de chute et forts débits.

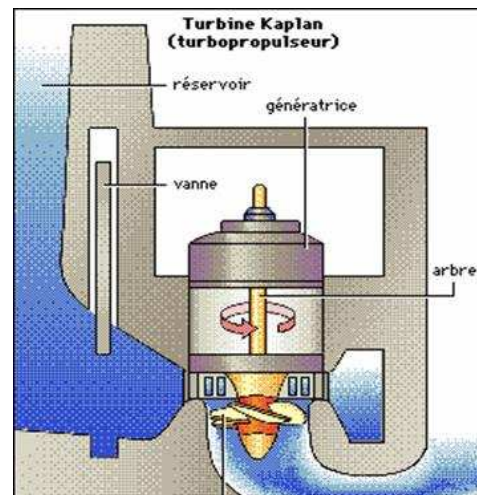


Figure 19 Turbine Kaplan

Caractéristiques

La qualité du remplissage du bassin dépend de la hauteur des vagues relativement à celle de la rampe de déferlement, mais également des effets de marées. Des solutions plus récentes permettent de mieux s'adapter à la hauteur de la houle en exploitant une rampe de déferlement incluant un système de captage échelonné le long de la rampe (Seawave Energy : SSG : Seawave Slot-cone Generator).

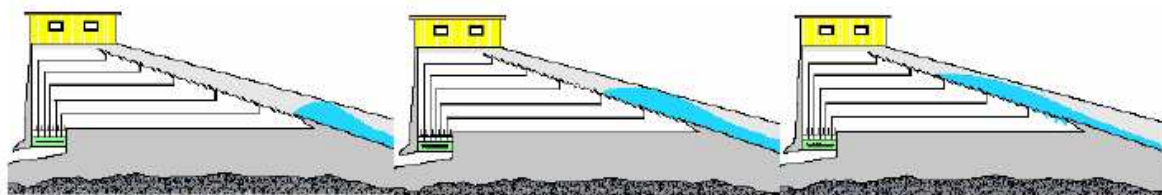
b) Seawave Slot-cone Generator

Historique

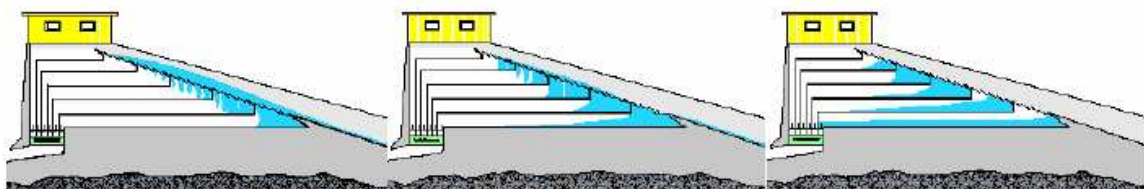
Ce système norvégien est encore en développement. Le premier prototype est actuellement en phase de test. La taille de ce système dépend directement de la taille de la digue. Les performances de ce système sont encore à tester à taille réelle. Les rendements de puissance annoncés sont de l'ordre de 50 %.



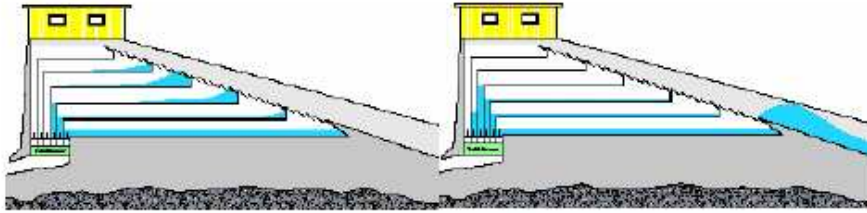
Principe



L'eau monte le long de la paroi.



La vague arrivée à la hauteur maximale, des trappes s'ouvrent pour laisser tomber l'eau de mer dans des bassins à différentes hauteurs.



L'eau provenant des bassins alimente des turbines et est rejeté dans la mer de l'autre côté.



Figure 20 : Système Seawave Slot-cone Generator

2°- Les systèmes à déferlement en mer(exemple : Wave dragon)

Historique

Ce système financé conjointement par le Danemark et l'Union européenne, est une machine qui a déjà été mise à l'épreuve. Le test a eu lieu en mer du Nord sur le site de Nissum Bredning. Il s'agit d'un énorme engin de 57 m de large (avec les bras) et de 237 tonnes muni d'un réservoir de 55 m³. Le test a débuté en mars 2003 et, au vu des résultats satisfaisants, le Wave Dragon a été connecté au réseau en mai 2003 et produit aujourd'hui de l'électricité. Pour ce faire, les machines sont installées proches des côtes pour être plus facilement reliées au réseau à l'aide de câbles sous-marins. La taille de ce prototype est quatre fois inférieure à celle du système complet



Figure 21 : photographie du dispositif à échelle réduite

Principe

Les deux immenses bras fixes de forme parabolique font converger les vagues vers le centre de l'engin. L'eau qui monte sur le socle central est d'abord amenée dans un réservoir surélevé. Une trappe s'ouvre avec les vagues pour laisser passer l'eau qui actionne ensuite une turbine de type Kaplan en retombant dans la mer. L'électricité est produite.

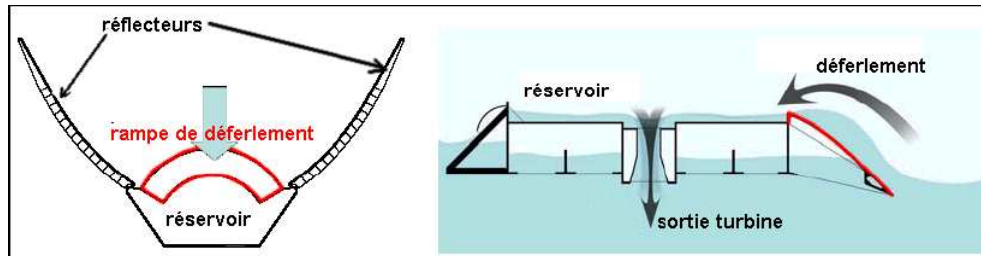


Figure 22 : Vues de dessus et de profil du système flottant Wave Dragon

Le Wave Dragon est un dispositif offshore, flottant et amarré. Il est lié au fond par un système d'ancrage. Il possède des chambres de lestage permettant d'ajuster sa ligne de flottaison en fonction de la houle incidente. Il est équipé de 16 turbines basse chute permettant d'évacuer l'eau du réservoir.

Caractéristiques

○ Dimensions

Les dimensions de la version échelle 1 sont 300 m (distance entre extrémités des bras), 170 m (longueur) et 17 m de hauteur dont 3 à 6 m au-dessus du niveau de la mer. La masse totale est de 33 000 tonnes avec un réservoir d'une capacité de 8 000 m³.



○ Puissance

Sa puissance maximale est de 7MW pour une production annuelle de 20GWh, pour une ressource moyenne de 36 kW/m. soit 2800 heures à pleine puissance (sur 8760 possibles).

○ Rendement

L'eau est turbinée dans des turbines de basse chute de type Kaplan. Il est intéressant d'exploiter plusieurs turbines de petite puissance (ici 16 à 20), plutôt qu'une seule, ce qui permet d'améliorer le rendement en fonction du débit disponible.

Conclusion

Comme nous venons de le voir tout au long de ce dossier, l'énergie houlomotrice a un fort potentiel qu'il serait dommage de ne pas exploiter.

Ainsi, afin de conclure, nous allons rappeler dans quel contexte l'énergie houlomotrice s'inscrit, quels sont les principaux pays qui misent sur cette énergie en n'oubliant pas de s'intéresser aux enjeux financiers et les impacts quand à l'exploitation de l'énergie houlomotrice.

1°-Contexte :

L'énergie houlomotrice constitue une des voies importantes dans la recherche en énergies renouvelables :

- « *L'impact sur l'environnement est plus faible* », affirme Jason Bak, président de Finavera Renewables, à Vancouver, au Canada

- « *En termes de ressources disponibles, les vagues représentent le plus gros potentiel de production* », explique Hakim Mouslim, ingénieur de recherche au Laboratoire de mécanique des fluides, rattaché à l'Ecole centrale de Nantes et au CNRS

L'énergie houlomotrice renferme un potentiel titanesque.

Si cette énergie était totalement convertie en électricité, les vagues qui déferlent en continu sur la façade atlantique de la France fourniraient 420 térawattheures par an, soit l'équivalent de 93 % de notre consommation électrique annuelle.

Et selon les scientifiques les plus optimistes, cette énergie pourrait couvrir 10 % d'énergie des besoins énergétiques des pays occidentaux.

Ainsi, une quarantaine d'organismes (laboratoires de recherche, entreprises...), répartis un peu partout dans le monde occidental (Australie, Danemark, Etats-Unis, France, Japon, Norvège...), recherchent la meilleure façon de récupérer l'énergie des vagues.

Il s'agit principalement de prototypes, notamment en France, Amérique du Nord, Ecosse, Norvège ou Portugal...

2°-Différents pays misent fortement sur l'énergie houlomotrice

Les pays européens souhaitant réduire leurs émissions de CO² s'intéressent de près à cette énergie.

Le Portugal qui a déjà largement investi dans les énergies renouvelables, avec les éoliennes, pense maintenant s'orienter vers l'énergie de la houle.

Ceci se justifiant par le fait qu'avec un potentiel d'énergie houlomotrice de 33 à 46 kW par mètre de côtes, le pays fait partie des meilleurs sites européens, d'autant que les vagues y sont particulièrement longues.

La Grande-Bretagne qui développe une multitude de projets concernant l'énergie houlomotrice depuis quelques années s'est engagé à réduire d'ici 2010 ses émissions de CO² de 20 % par rapport à celles de 1990, et souhaite que 10 % des énergies renouvelables soit de l'énergie houlomotrice.

Dans le reste du monde, ce sont généralement les côtes Est les mieux exposées, à l'exception des zones équatoriales : Nouvelle-Calédonie, Canada, Afrique du Sud...

3°-Enjeu financier

Les Américains n'étant pas leader dans le marché de l'énergie houlomotrice, l'Europe a sa carte à jouer.

A savoir que le marché européen de l'énergie houlomotrice est évalué à 32 milliards d'euros et le marché mondial à 10 fois plus.

4°-Impacts directs

- Les inventions rencontrent des obstacles technologiques et financiers ce qui ralentit leur industrialisation.
- Les machines seront installées loin de la côte entre 3 et 12 miles marins; elles ne seront donc pas un obstacle ni pour les surfeurs, ni pour les pêcheurs.
- Toutefois, les navigateurs réclament une signalisation des sites, afin d'éviter les risques de collision.
- Et les organismes de défense de l'environnement, seront vigilants quant au suivi des projets.

BIBLIOGRAPHIE WEBOGRAPHIE

- <http://www2.ademe.fr/servlet/getBin?name=04F5554A386CB39B7E8861C2BA2D54CD1142434342645.pdf>
- <http://www.ifremer.fr/dtmsi/colloques/seatech04/mp/article/1.contexte/1.1.ECRIN-OPECST.pdf>
- http://www.dictionnaire-environnement.com/energie_houlomotrice_ID1444.html
- <http://caderange.canalblog.com/tag/Energie%20Houlomotrice>
- <http://www.outilssolaires.com/Glossaire/prin-7EnR.htm>
- <http://www.lesechos.fr/info/innovation/4692415.htm>
- <http://www.enviro2b.com/environnement-actualite-developpement-durable/8457/article.html>
- <http://www.zurbains.com/article-894.html>
- http://www.lefigaro.fr/sciences/20060828.FIG000000128_un_serpent_pour_dompter_l_energie_des_vagues.html
- http://www.youtube.com/watch?v=GKry06Z6VWE&eurl=http://maheanu.free.fr/index.php/2007/11/28/une-centrale-houlomotrice-en-polynesie/&feature=player_embedded
- www.wave-energy.net
- <http://209.85.129.132/search?q=cache:3gtdwX1NQ4UJ:news.espace-enr.com/2008/05/httpwwwpole-mer.html+%22conf%C3%A9rence+internationale+sur+les+%C3%A9nergies+marines+renouvelables%22+new+york&hl=fr&ct=clnk&cd=1&gl=fr>
- <http://www.meteolafleche.com/houle.html>
- « Les Nouvelles Technologies de l' Energie », Hermès Publishing, ISBN 2-7462-1376-1, 2006
- <http://veleurope.free.fr/wavepower.pdf>
- <http://www.youtube.com/watch?v=r7-EPR8Ss6M>
- http://en.wikipedia.org/wiki/Wave_Dragon
- <http://www.wavedragon.net/technology/french.htm>
- <http://www.wavedragon.net/>
- http://perso.crans.org/~aubry/Rapport_final_M2R_Aubry.pdf
- <http://www.waveenergy.no/WorkingPrinciple.htm>
- <http://www.fujitaresearch.com/reports/limpet.html>
- <http://www.wave-energy.net/WaveEnergy/Developments.htm>
- <http://www.pico-owc.net/>
- <http://www.awsocan.com/PageProducer.aspx>
- http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/gp/gp_events/ocean_energy/1200_aws-mkii_en.pdf
- <http://polizeros.com/2007/04/27/wave-power-archimedes-wave-swing/>

