

N° d'ordre :

N° de série:

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



**Université'El-Oued**

Faculté des Sciences Technologiques  
*Département d' Electrotechnique*



**Mémoire de Fin d'Etude  
En vue de l'obtention du diplôme de**

**MASTER ACADEMIQUE**

Domaine : Sciences et de Technologies

Filière: Génie Électrique

Spécialité: Réseaux Électriques

**Thème**

**Récupération d'énergie des vagues  
pour la génération d'énergie électrique**

**Soutenu le Juin 2013**

Proposé et Dirigé par :

*Mr :Merazga Ezzeddine*

Présenté Par :

*- Labbi Ezzeddine*

*- Loucif Adel mortadha*

**Année Universitaire : 2012/2013**

# SOMMAIRE

---

|                                        |     |
|----------------------------------------|-----|
| ♦ Résumé                               |     |
| ♦ Dédicaces                            |     |
| ♦ Remerciements                        |     |
| ♦ Sommaire.....                        | i   |
| ♦ Liste des Figures.....               | iii |
| ♦ Liste des Symboles et Acronymes..... | iv  |

|                           |   |
|---------------------------|---|
| INTRODUCTION GÉNÉRAL..... | 1 |
|---------------------------|---|

## CHAPITRE I :

### *L'énergie des vagues ou énergie houlomotrice*

|                                                          |    |
|----------------------------------------------------------|----|
| I.1-Introduction.....                                    | 3  |
| I.2- Vagues : fonctionnement.....                        | 3  |
| I.2.1- Les vagues : des ondes à la surface de l'eau..... | 3  |
| I.2.2- La propagation des vagues.....                    | 7  |
| I.2.2.3- Mises en équation des vagues régulières.....    | 12 |
| I.2.2.4- Equations de propagation des vagues.....        | 16 |
| I.3- Energies des vagues.....                            | 18 |
| I.3.1- Une énergie marine renouvelable.....              | 19 |
| I.3.2- potentiel de l'énergie houlomotrice.....          | 19 |
| I.3.3- Techniques existantes.....                        | 20 |
| I.3.4- Avantages et inconvénients.....                   | 24 |
| I.4-Conclusion.....                                      | 25 |

## CHAPITRE II:

### *Récupération de l'énergie des vagues*

|                                                |    |
|------------------------------------------------|----|
| II.1- Introduction.....                        | 26 |
| II.2- Centrale à colonne d'eau oscillante..... | 26 |
| II.2.1- Principe de fonctionnement .....       | 27 |
| II.2.2- Puissance et lieu d'implantation.....  | 28 |

# SOMMAIRE

|                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| II.2.3- Un exemple concret; le LIMPET500 .....                         | 28 |
| II.2.4- Avantages et inconvénients.....                                | 29 |
| II.3- Système à flotteurs en surface ou semi immergé.....              | 31 |
| II.3.1- Projet prometteur : le Searev.....                             | 32 |
| II.3.2- Le Pelamis ou serpent des mers.....                            | 36 |
| II.4- Système Archimedes wave swing (AWS) .....                        | 39 |
| II.4.1- Appareillage.....                                              | 39 |
| II.4.2- Principe de fonctionnement.....                                | 40 |
| II.4.3- Avantages .....                                                | 40 |
| II.4.4- Performances .....                                             | 41 |
| II.4.5- Conditions d'installation .....                                | 41 |
| II.5- Systèmes à déferlement.....                                      | 42 |
| II.5.1- Les systèmes à déferlement situés sur les côtes.....           | 42 |
| II.5.2- Les systèmes à déferlement en mer (exemple :Wave dragon) ..... | 45 |
| II.6- Les autres projets exploitant les vagues.....                    | 46 |
| II.7- Conclusion.....                                                  | 52 |

## CHAPITRE III:

### *Convertisseur d'Énergie de Vague d'Océan : Ocean Wave Energy Converter (OWEC)*

|                                                          |    |
|----------------------------------------------------------|----|
| III.1- Introduction.....                                 | 53 |
| III.2- Analyse du bouées génératrices d'électricité..... | 53 |
| III.2.1- la théorie linéaire des vagues.....             | 54 |
| III.2.1.1 les équations qui régissent.....               | 54 |
| III.2.1.2 analyse et simulation des seul bouée CFD.....  | 58 |
| III.2.2 PMLG à entraînement direct utilisant FEM.....    | 58 |
| III.2.2.1 la structure PMLG .....                        | 59 |
| III.2.2.3 PMLG [8] [21] .....                            | 59 |
| III.2.3 Dynamique du système de bouées.....              | 62 |
| III.2.3.1 Conception de longeron.....                    | 63 |
| III.2.3.2 Densité d'énergie spectrale de vague.....      | 64 |
| III.3- Conclusion.....                                   | 68 |
| CONCLUSION GÉNÉRAL .....                                 | 69 |
| ♦ Bibliographie.....                                     | 70 |

## ملخص:

تعتبر طاقة أمواج البحر آمنة وليس لها أية مخاطر، و أكبر بكثير من طاقة الرياح، وهي أيضا موجودة على مدار 24 ساعة وطيلة أيام السنة تقريبا، بينما طاقة الشمس يستفاد منها أثناء النهار، وطاقة الرياح يستفاد منها في فترات متقطعة، كما أن الكهرباء الناتجة عن طاقة الأمواج أكثر ثباتاً.

إن الطاقة المتوفرة في البحر والمحملة على أمواجه من أفضل أنواع الطاقة الطبيعية، فهي آمنة ونظيفة ولا تنتضب وليست مهددة بالنفاذ كالبترول مثلاً. لذلك تستخدم هذه الطاقة لتوليد الطاقة الكهربائية التي نحن بأمرس الحاجة إليه، وذلك عن طريق تصميم وحدات لتوليد الكهرباء تعوم فوق البحار أو المحيطات، وبسبب تحريك الأمواج لهذه الوحدات فإن هذه الحركة الميكانيكية يمكن تحويلها إلى طاقة كهربائية يستفاد منها.

## Abstract:

The energy waves of the sea are safe and have no risk, and much larger than the wind, it is also present on the 24-hour almost every day of the year, while the sun's energy utilized during the day, and wind energy utilized in intermittent, the electricity generated by wave energy it is the most firmer.

The available power at sea and loaded on the waves of the best types of natural energy, they are safe and clean and inexhaustible but not threatened access such as oil, for example. Therefore use this energy to generate electric power that we needed him most, through a modular design to generate electricity floats above the sea or oceans, and because of the move to these waves, these units can be converted into mechanical movement into electrical energy utilized.

## Résumé :

Les vagues d'énergie de la mer sont sécuritaires et sans risque, et beaucoup plus que le vent, elle est également présente sur le 24 heures presque tous les jours de l'année, tandis que l'énergie du soleil utilisée pendant la journée, et l'énergie éolienne utilisée dans intermittent, l'électricité produite par l'énergie des vagues le plus ferme.

La puissance disponible à la mer et chargé sur leur vagues est les meilleurs types d'énergie naturelle renouvelable, ils sont sûrs, propres et inépuisables, mais pas menacés accès telles que le pétrole, et les autre types. Donc utiliser cette énergie pour produire de l'énergie électrique que nous avons besoin de lui plus, grâce à une conception modulaire pour générer des flotteurs de l'électricité au-dessus de la mer ou océans, et en raison du mouvement de ces vagues, ces unités peuvent être converties en mouvement mécanique en énergie électrique utilisée.

## *Remerciement*

*En premier lieu, nous tenons à remercier «**DIEU**» qui nous a aidé pour que ce modeste travail soit achevé et pour que nous avons réussi.*

*Nous tenons à remercier vivement tous ceux qui nous a orientées et nous a encouragées. Nous pensons en particulier à notre encadreur: Labbi Yacin , d'avoir nous bien suivi et dirigé notre travail et de nous faire profités de son savoir, ainsi de ses conseils, et pour toute l'aide, les remarques constructive qui nous ont d'améliorer ce travail, et qui grâce a lui nous avons pus réaliser nos objectif.*

*Nous précieux remerciements vont au président et membres de jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptent de juger ce travail.*

*Nous grands remercient aussi tous les enseignants qui ont contribué à notre formation a l'institut d'électrotechnique.*

*En fin, nous remercions nos amis pour leur aide, leur soutien et leur compréhension.*

# Liste des figures

|                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure II.1</b> Colonne d'eau oscillante.....                                                          | 27 |
| <b>Figure II.2</b> Colonne d'eau oscillante-phase .....                                                   | 28 |
| <b>Figure II.3</b> représentation schématique de la houle.....                                            | 28 |
| <b>Figure II.4</b> planisphère d'amplitude de la houle.....                                               | 29 |
| <b>Figure II.5</b> turbine de l'IMPET 500.....                                                            | 30 |
| <b>Figure II.6</b> massif en béton comprenant la colonne et la centrale.....                              | 30 |
| <b>Figure II.7</b> centrale a colonne d'eau oscillante Off-Shore.....                                     | 31 |
| <b>Figure II.8</b> Mouvements d'un bateau selon les trois axes.....                                       | 32 |
| <b>Figure II.9</b> Searev-phase 1 .....                                                                   | 33 |
| <b>Figure II.10</b> Searev-phase 2.....                                                                   | 34 |
| <b>Figure II.11</b> Searev-phase 3 .....                                                                  | 34 |
| <b>Figure II.12</b> Searev-phase 4 .....                                                                  | 35 |
| <b>Figure II.13</b> Searev-Phase 5 .....                                                                  | 35 |
| <b>Figure II.14</b> Pélamis .....                                                                         | 36 |
| <b>Figure II.15</b> schéma d'un module de conversion d'énergie.....                                       | 37 |
| <b>Figure II.16</b> Construction du Pélamis.....                                                          | 38 |
| <b>Figure II.17</b> système à piston flottant.....                                                        | 39 |
| <b>Figure II.18</b> On peut voir la station de production AWS MK 1 avant immersion, .....                 | 41 |
| <b>Figure II.19</b> Principe du système à déferlement Tapchan.....                                        | 42 |
| <b>Figure II.20</b> Turbine Kaplan.....                                                                   | 43 |
| <b>Figure II.21</b> Système Seawave Slot-cone Generator.....                                              | 44 |
| <b>Figure II.22</b> photographie du dispositif à échelle réduite.....                                     | 45 |
| <b>Figure II.23</b> Vues de dessus et de profil du système flottant Wave Dragon .....                     | 45 |
| <b>Figure II.24</b> Waveplane.....                                                                        | 47 |
| <b>Figure II.25</b> Limpet.....                                                                           | 47 |
| <b>Figure II.26</b> Oweco.....                                                                            | 48 |
| <b>Figure II.27</b> Energetech.....                                                                       | 48 |
| <b>Figure II.28</b> Energetech-Croquis.....                                                               | 48 |
| <b>Figure II.29</b> AquaBuoy/Owec.....                                                                    | 48 |
| <b>Figure II.30</b> Wavebob.....                                                                          | 49 |
| <b>Figure II.31</b> Orecon.....                                                                           | 49 |
| <b>Figure II.32</b> PSP.....                                                                              | 50 |
| <b>Figure II.33</b> Seavolt.....                                                                          | 50 |
| <b>Figure II.34</b> Powerbuoy.....                                                                        | 51 |
| <b>Figure II.35</b> SSG.....                                                                              | 51 |
| <b>Figure II.36</b> Wave Swing.....                                                                       | 52 |
| <b>Figure III.1</b> l'ensemble de la bouée.....                                                           | 59 |
| <b>Figure III.2</b> Circuit électrique de PMLG.....                                                       | 59 |
| <b>Figure III.3</b> déplacement des vagues en m, vitesse [m/s], le courant, la tension, l'efficacité..... | 60 |
| <b>Figure III.4</b> le courant, la tension, l'efficacité.....                                             | 61 |
| <b>Figure III.5</b> L'énergie des vagues capturé par le système OWEC.....                                 | 62 |
| <b>Figure III.6</b> fonction de transfert longeron.....                                                   | 64 |
| <b>Figure III.7</b> Spectre d'énergie pour l'été et l'hiver.....                                          | 65 |
| <b>Figure III.8</b> Vitesses des courants de marée dans le Raz de Sein.....                               | 65 |
| <b>Figure III.9</b> Caractéristiques de la houle.....                                                     | 66 |
| <b>Figure III.10</b> Performances de la génératrice pour une ressource perturbée.....                     | 68 |

## Liste des Symboles et Acronymes

|          |                                                   |
|----------|---------------------------------------------------|
| OWEC     | Ocean convertisseur d'énergie du vagues.          |
| $g$      | Accélération due à la pesanteur, $m/s^2$          |
| $\rho$   | Densité de l'eau, $kg/m^3$                        |
| $a$      | Ampleur de la vague, m                            |
| $H$      | Hauteur des vagues m                              |
| $T$      | Période des vagues, sec                           |
| $\omega$ | Vague fréquence, rad /s                           |
| $P$      | L'énergie des vagues par unité de largeur, k W/m  |
| $V_{ol}$ | Volume déplacé de l'eau, $m^3$                    |
| $M'$     | Masse d'eau entraînée, kg                         |
| $b$      | Coefficient d'amortissement hydrodynamique, kNs/m |
| mean P   | Moyenne puissance convertie, kW                   |
| PMLG     | Générateur linéaire a Aimant Permanent.           |
| Taup     | aimant Longueur                                   |
| Tau      | Pole pitch                                        |
| hm       | Aimant hauteur de l'anneau                        |
| hsu      | Profondeur de tranchée                            |
| ts       | fente d'ouverture                                 |
| Im       | Courant de Generator                              |
| El       | Emf Généré en PMLG                                |
| Fpk      | Poussée de crête                                  |
| d        | Diamètre du flotteur (bouée)                      |
| A        | amplitude de l'onde                               |
| At       | Amplitude des ondes transmises                    |
| v        | potentiel magnétique                              |
| M        | vecteur aimantation                               |
| z        | position du traducteur                            |

## **Introduction générale**

L'énergie des vagues ou énergie houlomotrice est une énergie marine utilisant la puissance du mouvement des vagues de houle.

Les technologies qui permettent de capter l'énergie des vagues ont été mises au point il n'y a que 30 à 35 années. L'Angleterre et le Japon ont été les premiers pays à mettre au point des méthodes pour capter l'énergie des vagues. Aujourd'hui, des entreprises ont construit, ou sont en train de construire, des installations qui convertissent l'énergie des vagues en électricité un peu partout dans le monde. Malgré un potentiel important, la France est pratiquement absente dans ce secteur.

En général, les convertisseurs d'énergie houlomotrice utilisent le mouvement ascendant et descendant des vagues pour produire de l'électricité. Il y a plusieurs types de systèmes. Certains systèmes extraient l'énergie des vagues de surface tandis que d'autres utilisent l'énergie des fluctuations de pression sous la surface de l'eau ou provenant de la vague elle-même. Certains systèmes sont fixes tandis que d'autres suivent le mouvement des vagues.

De très nombreux dispositifs ont été expérimentés avec deux grandes catégories : les dispositifs côtiers et les dispositifs de pleine mer (off-shore). Les premiers utilisent le déferlement des vagues, les seconds utilisent les variations du niveau de la mer lors du passage de la houle. Les dispositifs côtiers sont faciles à construire et à entretenir mais leur rendement est nettement moins bon que les dispositifs off-shore qui exploitent des vagues plus puissantes et plus régulières. Les méthodes les plus couramment utilisées pour capter l'énergie des vagues comprennent : le système à colonne d'eau oscillante, le système à batteurs et le système à canal.

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.

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.

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, ...

Cette mémoire traite, en deux parties, de la problématique de récupération de l'énergie de la houle. La première partie est consacrée à la caractérisation de la ressource énergétique que constitue la houle, et dans un second temps, à la modélisation physique de l'interaction d'un fluide avec une structure, problème physique typique dans la récupération de l'énergie des vagues. Dans la seconde partie, un panorama de plusieurs récupérateurs de l'énergie de la houle, aussi appelés houlogénérateurs, sera présenté mais ne saurait être exhaustif étant donnée la diversité de principes qui existent. Le dernier chapitre mettra en avant les problématiques de génie électrique spécifiques à de tels systèmes.

Le premier chapitre: Dans ce chapitre, on a présenté des informations sur la les vagues, et l'énergie des vagues ou énergie houlomotrice d'une manière générale.

Le deuxième chapitre: nous étudierons les différents manières de récupérer l'énergie délivrée par les vagues.

Le troisième chapitre : on s'intéresse au convertisseur d'énergie de vague d'océan (OWEC : ocean wave energy converter) et nous allons étudier leur simulation numérique dans le but de mieux comprendre le système choisie.

Enfin quelques conclusions et directives possibles de ce travail sont mentionnées à la fin de cette mémoire.

# Chapitre Un

## L'énergie des vagues ou énergie houlomotrice

---

### I.1- Introduction

Lorsque le vent souffle sur la surface d'un fluide, une agitation se crée sous la forme de vagues. Ces vagues ont toujours fasciné les hommes par leur mouvement, leur irrégularité, leur splendeur, et leur puissance. Ces vagues ont très longtemps résisté à l'Homme qui n'a jamais réussi à les décrire parfaitement dans des équations et lui causent beaucoup de dommages. En outre, la vague permet la biodiversité du milieu aquatique, elle est donc un phénomène physique essentiel du monde. Ainsi notre choix s'est porté sur ces vagues si fascinantes et si puissantes, notre travail sera dirigé par la problématique suivante : Comment la puissance considérable des vagues exerce un effet sur l'environnement et peut-elle produire de l'énergie électrique ?

Pour tenter d'apporter une réponse précise à cette question, nous verrons dans une première partie, la description des vagues, expliquées et mises en équation afin de connaître leur structure. Puis dans la deuxième partie, nous étudierons l'impact de la vague sur l'environnement et les moyens mis en place par l'Homme pour s'en protéger et enfin, nous terminerons par l'étude de l'énergie issue des vagues : l'énergie houlomotrice.

### I.2- Vagues : fonctionnement

Depuis des millénaires, les vagues ont toujours fasciné les hommes par leur beauté, leur force et leur irrégularité. Il faut attendre le XIX<sup>e</sup> siècle pour observer l'apparition des premières équations décrivant les vagues avec notamment les équations d'Euler qui seront complétés par les équations de Navier-Stokes au siècle suivant. Ces modèles malgré leur évolution restent aujourd'hui très approximatifs envers la réalité. Cette approximation est le prix à payer pour simplifier les phénomènes afin d'obtenir des solutions au problème que l'homme se propose de résoudre. La vague est de plus en plus connue dans ses moindres recoins par l'Homme car elle obéit aux lois qui régissent les ondes [1].

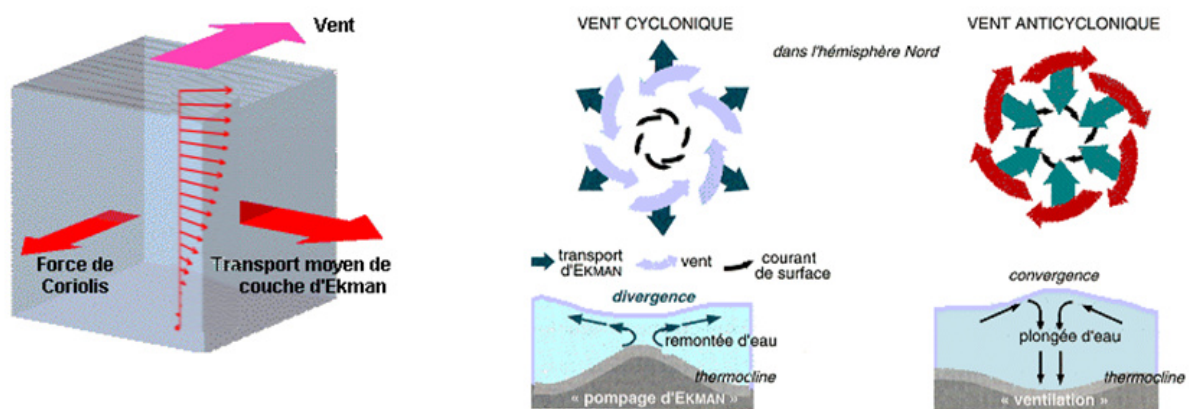
#### I.2.1- Les vagues : des ondes à la surface de l'eau

##### *A) Qu'est-ce qu'une vague ?*

Une vague correspond à une onde de gravité (onde se déplaçant à la surface libre d'un fluide soumis à la gravité) qui implique théoriquement toute la profondeur. Le vent provoque tout d'abord des différences de hauteur de la surface de la mer qui vont se propager

---

approximativement dans la direction du vent. Pour approcher précisément la réalité, il faut faire intervenir le phénomène du transport d'Ekman : la couche de surface de l'océan est mise en mouvement par le vent mais cette couche de surface est déviée vers la droite dans l'hémisphère Nord et vers la gauche dans l'hémisphère Sud par la force de Coriolis (force qui agit sur n'importe quel corps mobile dans un système tournant indépendamment). Cette déviation va alors se propager vers le bas par viscosité du fluide et le transport moyen de matière obtenu ne correspondra pas du tout à l'axe des vents de surface. On obtiendra alors une convergence ou une divergence (provoquant les deux situations montrées dans le schéma suivant) selon la trajectoire des vents[2].



**Figure I.1** L'effet de la spirale d'Ekman sur le transport horizontal et vertical de l'eau en océan

L'énergie potentielle de l'eau au sommet de la vague est largement supérieure à celle dans les creux, la gravité va donc ramener les deux parties vers le point médian, ce qui provoque la propagation de l'onde.

Comme les vagues sont des ondes, elles peuvent donc subir les trois phénomènes suivants : la réflexion, la réfraction et la diffraction.

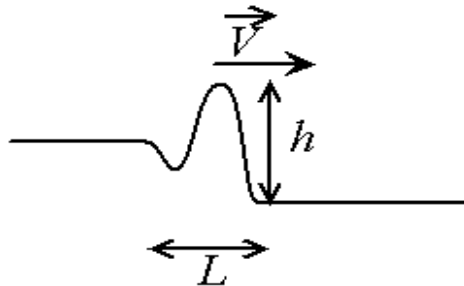
Enfin, le terme « houle » est utilisé par les hydrauliciens par abus de langage pour désigner tous les types de vague : vagues régulières et vagues irrégulières. La houle correspond en fait à la partie de l'état de la mer qui se caractérise par son absence de relation avec le vent local.

### ***B) Les quatre paramètres de caractérisation des vagues***

Une vague possède toujours 4 paramètres :

- La vitesse de propagation

- La hauteur de la vague
- La largeur de la vague
- La forme vue de haut : circulaire ou linéaire

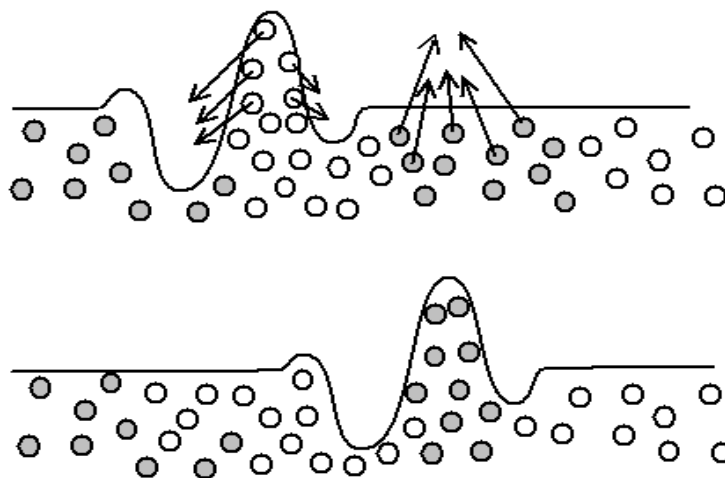


**Figure I.2** Schéma représentant les trois grands paramètres numériques qui caractérisent une vague

On considère très souvent que le front est droit car lorsqu'on est loin du centre d'un front circulaire, l'arc de cercle devient assimilable à une droite.

### ***C) La vague : un déplacement d'énergie pas de matière***

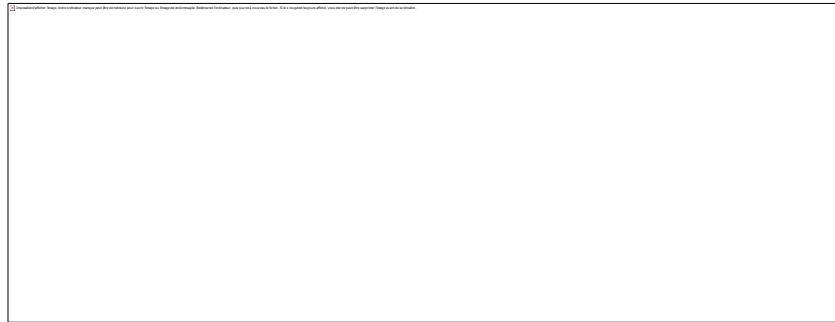
Réalisons une expérience : mettons de l'eau et du poivre dans une bassine, provoquons des vagues en tapotant l'eau. Le poivre ne bouge pas, on peut donc en déduire qu'il n'y a pas de déplacement de l'eau mais seulement un déplacement d'énergie. Comme l'eau est plus haute à l'endroit de la vague alors l'énergie déplacée correspond à l'énergie potentielle de gravité. L'eau liquide est en fait constituée de molécules en constante agitation dans tous les sens mais il n'y a pas de déplacement en moyenne. Lorsque la vague passe, les molécules d'eau forment ensemble un monticule puis après le passage de la vague le monticule s'effondre. Un autre monticule se forme alors un peu plus loin sur le trajet de la vague, le phénomène se répète des milliers de fois [3].



**Figure I.3** Schéma de la formation du monticule lors du passage de la vague puis de l'effondrement de ce monticule

### ***D) Les vagues régulières et les vagues irrégulières***

Lorsque les vagues se propagent hors de la région de génération, elles se rapprochent de plus en plus du modèle de la vague régulière sans jamais y parvenir car d'autres paramètres vont l'empêcher de devenir un phénomène monochromatique. Une vague régulière correspond à une vague périodique, on considère que la « houle » correspond à des vagues régulières pour simplifier. Lorsque le phénomène est périodique, on appelle la période notée  $T$  le temps en secondes qui sépare deux répétitions successives du phénomène. La fréquence exprimée en Hertz correspond à l'inverse de la période :  $\nu = 1/T$ . Les vagues qui vont se succéder seront exactement pareilles donc la distance entre les crêtes sera toujours la même : c'est la longueur d'onde notée  $\lambda$ . L'amplitude  $A$  est égale à la moitié de la hauteur  $h$  de la vague : c'est en fait la profondeur au creux de chaque vague [3].



**Figure I.4** Schéma d'une succession de vagues périodiques ayant donc toutes la même amplitude et la même longueur d'onde

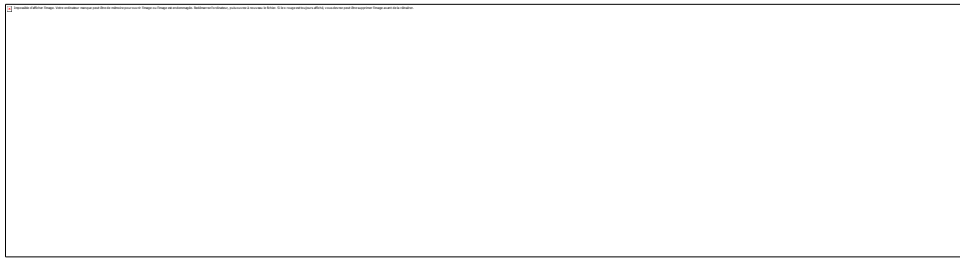
On considérera qu'un phénomène naturel (la houle) correspond à des vagues régulières mais il faut faire attention, un tsunami n'est en aucun cas une vague régulière.

Il y a une périodicité spatiale : en effet au même instant si l'on se déplace d'une distance égale à la longueur d'onde dans la direction de propagation des vagues, on retrouve la même hauteur d'eau.

De même, il y a aussi une périodicité temporelle : si on prend un point fixe chaque vague arrivera à ce point à chaque intervalle de temps égal à la période.

Cette double périodicité permet d'exprimer la vitesse d'avancement des vagues notée  $V$  : en effet les vagues ont avancé d'une distance égale à une longueur d'onde après une période. Il vient donc [2]:

$$V = \frac{\lambda}{T} = \lambda \times \nu. \quad \text{I-1}$$



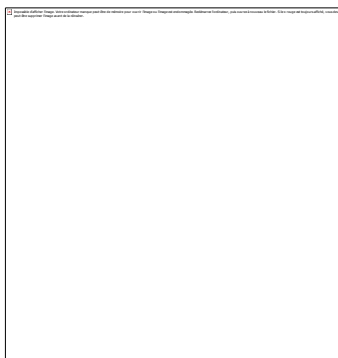
**Figure 1.5** Schéma de la conséquence de la double périodicité : la vitesse d'avancement des vagues

## I.2.2- La propagation des vagues

Comme les vagues sont des ondes, elles peuvent subir les trois phénomènes de propagation des ondes : la réflexion, la diffraction et la réfraction. Pour les vagues régulières, ces trois phénomènes sont facilement applicables mais pour les vagues irrégulières (naturelles), l'application se complexifie relativement. Il y a cependant un avantage qui favorise fortement l'étude des vagues : celles-ci ont des longueurs d'onde à l'échelle humaine (contrairement aux ondes lumineuses) [3].

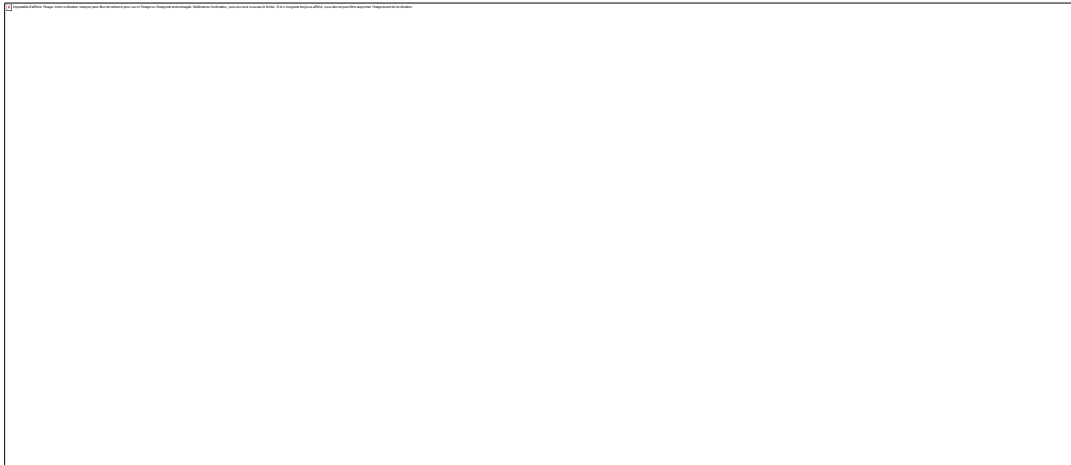
### A) La réflexion

Le phénomène de réflexion a lieu lorsqu'une vague rencontre un objet de hauteur immergée importante par rapport à la profondeur et de largeur importante par rapport à la longueur d'onde. Ainsi si une vague rencontre l'étrave (pièce saillante de la coque à l'avant) d'un navire, elle ne sera pas réfléchi car la largeur de l'objet rencontré est presque nulle. En revanche, si cette même vague arrive parallèlement au navire alors elle sera réfléchi car la largeur de l'objet vaut de quelques dizaines de mètres à plusieurs centaines. Pour mieux comprendre, il faut observer le phénomène de réfraction lorsqu'une vague rencontre le bord d'une piscine parfaitement rectiligne. Deux cas doivent être traités : le cas où le front de la vague est parallèle au bord de la piscine et celui où il forme un angle avec le bord.



**Figure 1.6** Vue en coupe de la réflexion de la vague sur le bord de la piscine lorsque le front est parallèle au bord

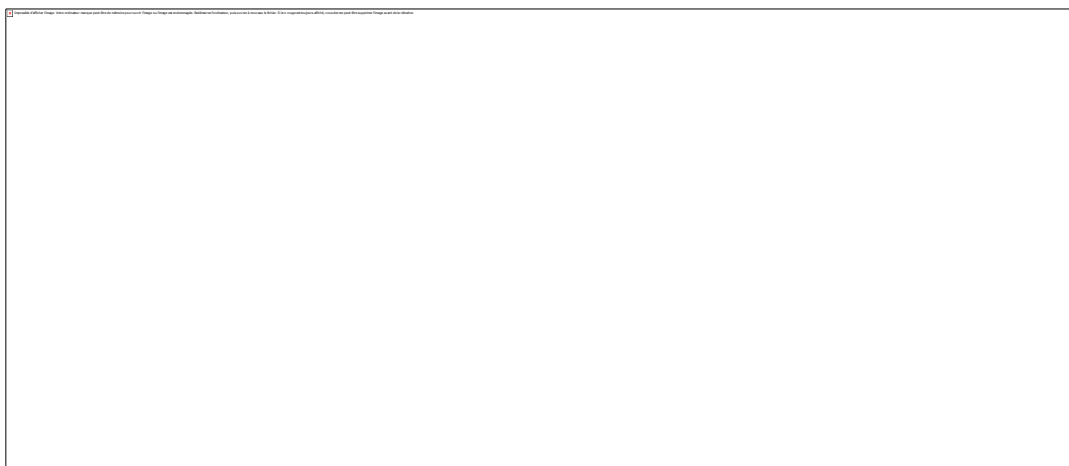
La vague frappe le bord de la piscine parallèlement puis elle repart en arrière d'après le phénomène de réflexion.



**Figure I.7** Schémas de réflexion de la vague sur le bord de la piscine lorsque le front n'est pas parallèle au bord

Si la vague n'arrive pas face au bord de la piscine, elle est réfléchi de sorte que le front fasse le même angle avec le bord après le phénomène de réflexion. Les quatre premiers schémas sont à intervalles de temps constants. Le dernier schéma permet de comprendre ce qu'il se passe dans la réalité en trois dimensions.

Le phénomène de réflexion obéit aux lois de Snell-Descartes pour la réflexion qui mentionnent que la vague réfléchi est dans le plan d'incidence et que les angles incidents et réfléchis sont égaux.



**Figure I.8** Schéma du phénomène de la réflexion de Descartes

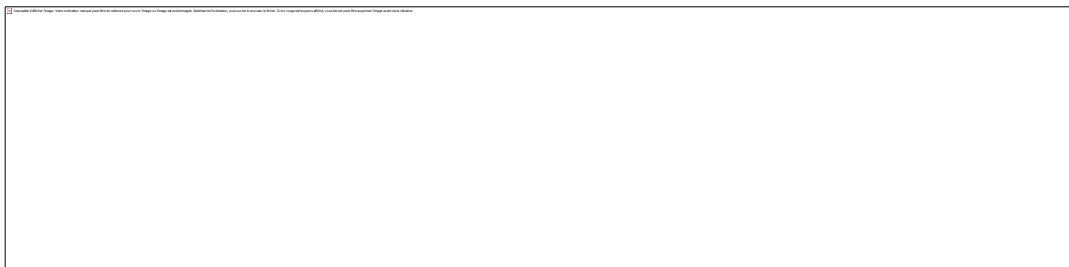
Les fronts de la vague font le même angle  $\alpha$  avec le bord de la piscine, les directions de la vague font le même angle  $\beta$  avec le bord.

En outre, si les vagues arrivent obliquement la superposition de ondes incidentes et réfléchies produit une mer gaufrée.

### ***B) La diffraction : la rencontre de la vague avec un obstacle***

Lorsqu'une vague rencontre un obstacle, elle est perturbée : c'est le phénomène de diffraction. On distinguera deux cas de la diffraction [2]:

- Les dimensions de l'obstacle restent relativement petites par rapport à la longueur d'onde des vagues : on observe alors des perturbations de la vague dans toutes les directions.
- Lorsque les dimensions de l'obstacle sont grandes par rapport à la longueur d'onde des vagues, la diffraction devient alors une réflexion (le cas de la réflexion est précédemment traité). Le problème en réalité est relativement complexe car il reste des perturbations aux bords de l'objet très difficiles à expliquer. Ces perturbations ne seront donc pas étudiées.



**Figure I.9** Schémas du phénomène de la réfraction des vagues :

- L'objet est très petit par rapport à la longueur d'onde des vagues : les perturbations sont très faibles.
- La taille de l'objet est de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde des vagues : les perturbations sont nombreuses et partent dans tous les sens.
- La taille de l'objet est largement supérieure à la longueur d'onde des vagues : le phénomène de réflexion a alors lieu.

### ***C) La réfraction***

Le phénomène de réfraction permet d'expliquer le déferlement des vagues sur une plage. La célérité des ondes dans l'eau dépend de la profondeur du liquide, de la vitesse du courant et de leur amplitude. La profondeur est le paramètre influant le plus la célérité, plus la profondeur est importante plus la célérité de la vague est forte. Ainsi lorsqu'une vague se dirige vers une plage,

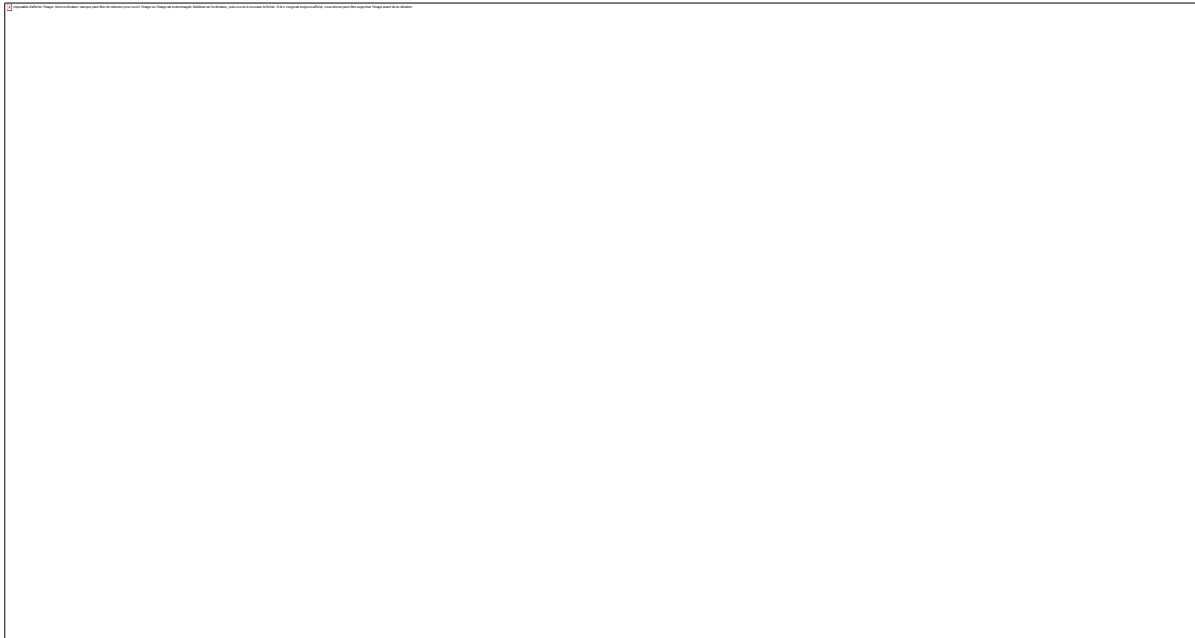


sa vitesse diminue de plus en plus car la profondeur diminue plus ou moins régulièrement. Si une vague arrive obliquement par rapport à une plage alors son extrémité la plus proche de la plage va fortement réduire sa vitesse donc la ligne de crête va se tourner face à la plage puis déferler sur celle-ci.

#### ***D) Les rencontres de vagues : les interférences***

Lorsque deux vagues se rencontrent (on parle alors d'interférence), leurs hauteurs s'ajoutent :

- Lorsque deux « bosses » ou deux « creux » se rencontrent, elles s'ajoutent, on parle donc d'interférence constructive, les vagues s'amplifient alors.
- Lorsqu'un « creux » ou une « bosse » se rencontrent, ils se retranchent, on emploie donc le terme d'interférence destructive, les vagues s'annulent dans ce cas.

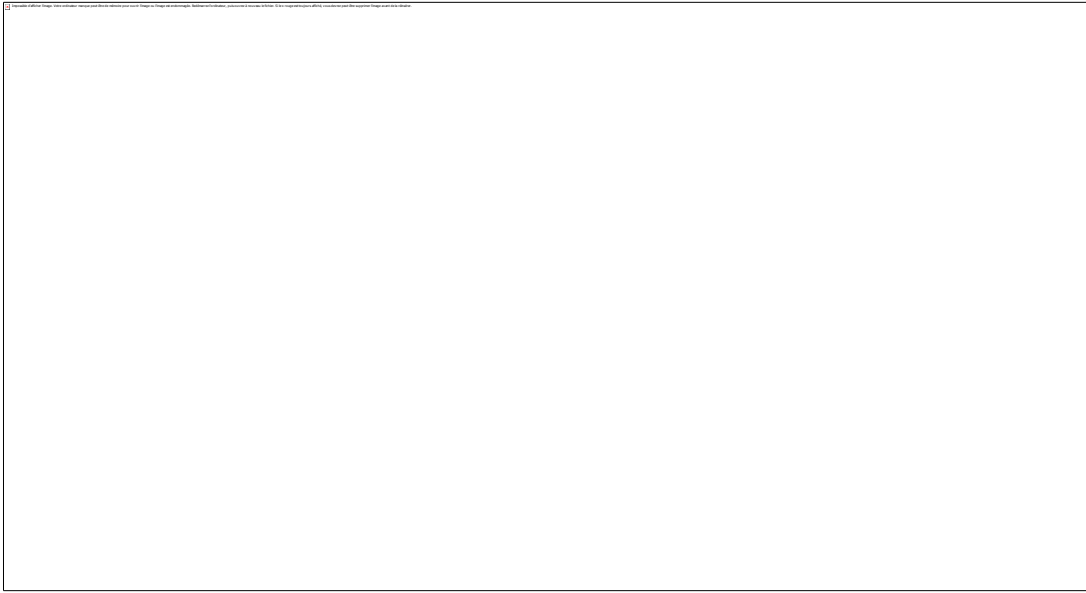


**Figure I.10** Schéma en 6 étapes de la rencontre de deux vagues : interférences constructives (c) et destructrice (d)

Nous allons maintenant étudier les cas des vagues périodiques, on emploie alors des vagues de même amplitude dans trois cas différents :

#### ***a) Fréquences très différentes mais très proches***

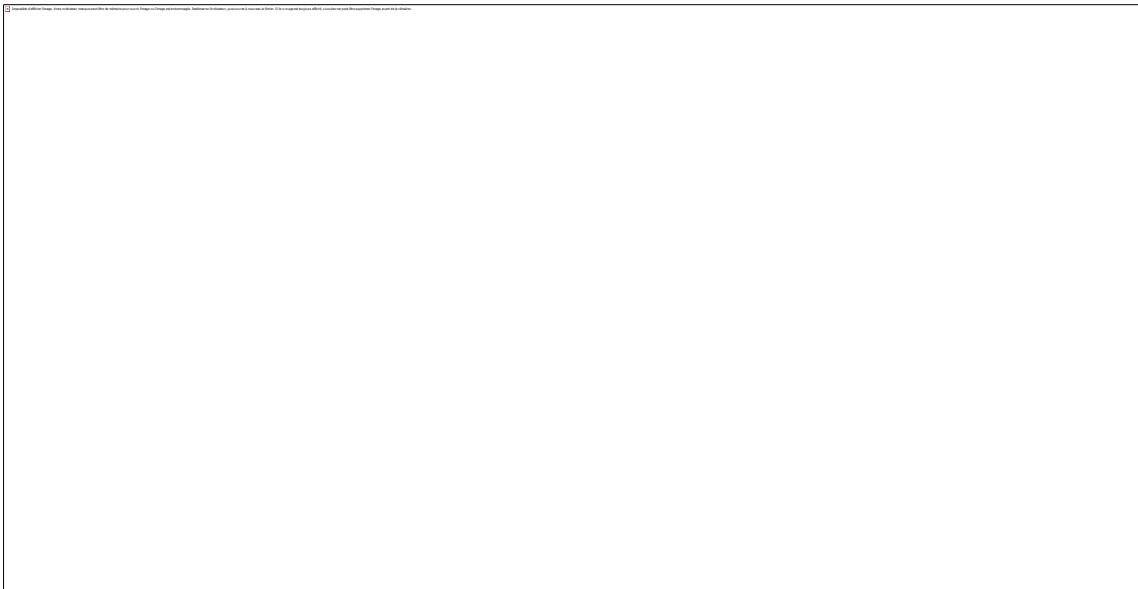
Des fuseaux correspondant à l'ajout des profils des deux vagues apparaissent, la courbe obtenue est limitée par ce que l'on appelle une « enveloppe ». Le maximum atteint par la courbe obtenue correspond à une interférence constructive alors que les minimums se traduisent par des interférences destructives.



**Figure I.11** *Etude de l'interférence de deux vagues périodiques de fréquences légèrement différentes : (c) correspond à l'interférence constructive et (d) correspond aux interférences destructrices*

***b) Fréquences très différentes***

Lorsqu'on a des fréquences très différentes, on observe que la courbe obtenue est modulée par la courbe de la vague qui a la fréquence la plus importante. En fait, cela ressemble à une « greffe » de la deuxième courbe sur la première courbe (haute fréquence).

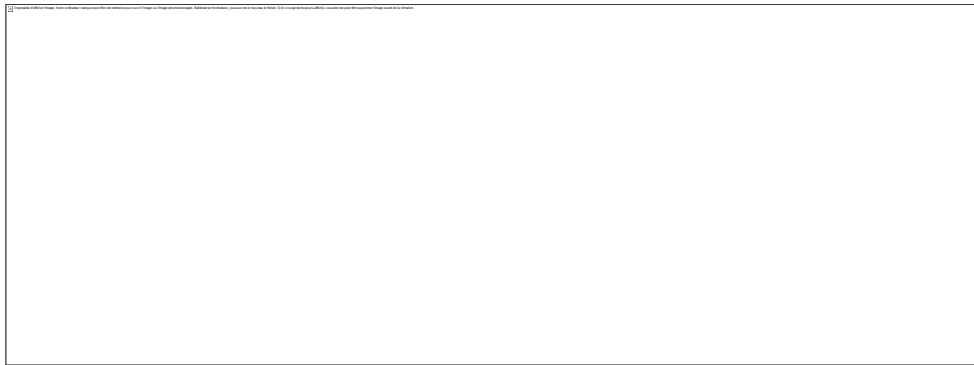


**Figure I.12** *Interférence de deux vagues périodiques de fréquence très différentes : la haute fréquence module la basse fréquence*

### ***c) Fréquences égales mais des courbes décalées***

Lorsque les vagues ont la même fréquence mais sont déphasées (décalées), la courbe résultante est une courbe très simple. Seule l'amplitude varie en fonction de la distance de décalage et son importance par rapport à la longueur d'onde. Il existe trois principaux cas :

- Si le décalage vaut une demi-longueur d'onde alors la résultante est nulle. On qualifie alors les vagues de « vagues en opposition de phase »
- Si la valeur du décalage est proche d'une demi-longueur d'onde alors l'amplitude est très faible. On a donc des interférences destructrices.
- Si la valeur du décalage est presque nulle alors on obtient une amplitude très élevée, des interférences constructrices se produisent donc.



**Figure I.13** Schéma de deux interférences entre deux vagues de même fréquences mais déphasées : l'amplitude est élevée si le décalage est faible, l'amplitude est faible si le décalage vaut presque  $\lambda/2$

### **I.2.2.3- Mises en équation des vagues régulières**

#### ***A) Le problème et les domaines de validité***

Données:

$h$  : profondeur en mètres

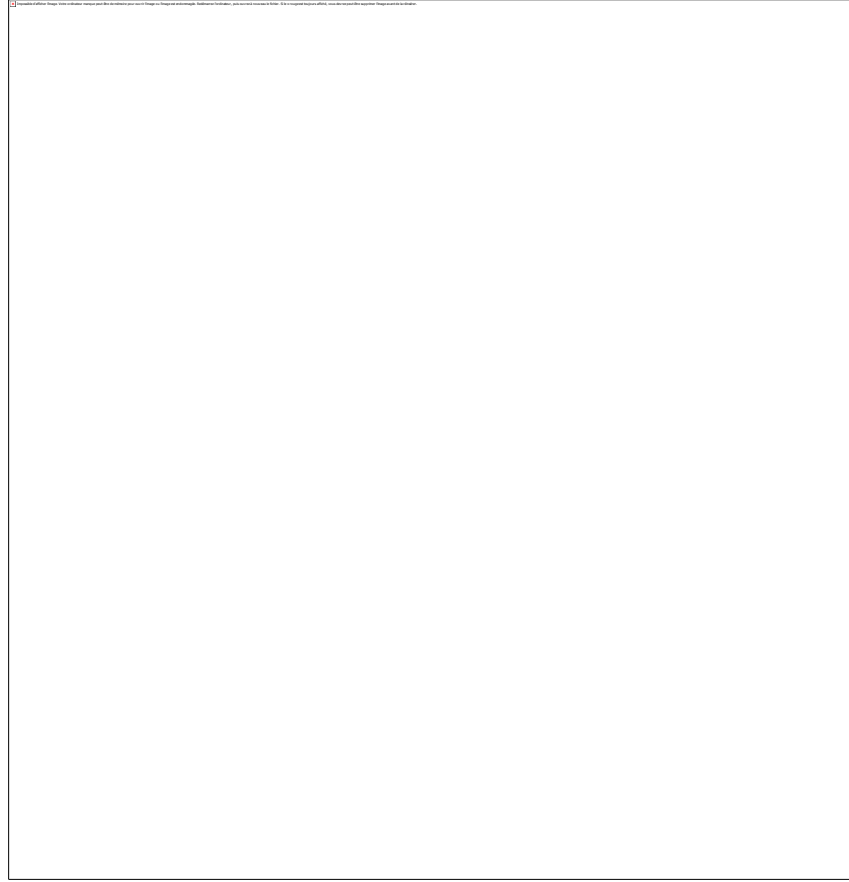
$H$  : hauteur de crête à creux en mètres

$\lambda$  : longueur d'onde en mètres

$g$  : accélération de la pesanteur à la surface de la Terre en mètres. secondes<sup>-2</sup>

$T$  : période en secondes

$H_B$  : hauteur limite de déferlement en mètres



**Figure I.14** Graphique des domaines de validité des théories approchées pour les vagues régulières en fonction des données caractéristiques d'une vague :  $h$ ,  $H$ ,  $\lambda$

$$\frac{H}{g \times T^2} = \frac{H}{\lambda} : \text{Cambrure (nombre sans dimensions) I-2}$$

$$\frac{h}{g \times T^2} = \frac{h}{\lambda} : \text{Profondeur relative (nombre sans dimensions) I-3}$$

L'axe des abscisses de ce graphique correspond donc à la profondeur relative tandis que l'axe des ordonnées correspond à la cambrure de la vague. Ce graphique n'est pas orthonormé : à chaque unité chaque valeur est multipliée par deux. Ce graphique va permettre une modélisation qui tente d'être la plus précise possible mais qui reste relativement grossière : l'irrégularité des vagues naturelles n'est pas prise en compte de même que leur aspect tridimensionnel. En outre, la profondeur est supposée constante alors qu'elle varie dans la plupart des cas. Malgré tous ces suppositions et ces approximations, ce modèle permet d'approcher de très près la réalité tant cherchée[3].

La description des vagues est réalisée désormais grâce à la mécanique des fluides, elle n'est pas extrêmement complexe puisque la viscosité (la résistance d'un fluide à l'écoulement

uniforme et sans turbulence), la compressibilité (l'aptitude d'un corps à diminuer de volume sous l'effet d'une augmentation de pression), l'existence de tourbillons (mouvement circulaire ou hélicoïdal de l'eau) sont ignorés. Dans ces conditions, le problème est solvable grâce à la description eulérienne classique du champ des vitesses : une des deux techniques qui permettent de caractériser un écoulement en dynamique des fluides. Celle-ci décrit le champ de vitesses qui associe à chaque point un vecteur vitesse, elle correspond en fait à une photographie avec un temps de pose assez court d'un écoulement muni de particules colorées qui permet de visualiser les éléments de ce champ de vitesses à un instant donné. Un temps de pose plus long correspondrait à la description lagrangienne (la deuxième méthode)[2]. Le champ de vitesses est décrit en donnant à tout instant  $t$  le vecteur vitesse  $V$  en tout point  $M$  :  $V(M, t)$ .

Il faut maintenant relier le champ de vitesses à un potentiel des vitesses. Comme le fluide est supposé parfait, qu'on suppose l'absence de tourbillons et de turbulence ; l'écoulement est donc irrotationnel et le rotationnel des vitesses est nul. On a donc :

$$\mathbf{rot}V = 0 \quad \text{I-4}$$

On admet que cette équation a pour solution un gradient (une grandeur vectorielle qui indique de quelle façon une grandeur physique varie dans l'espace) :

$$V = \mathbf{grad}\varphi \quad \text{I-5}$$

On sait que la vitesse dérive d'un potentiel (la fonction des coordonnées qui décrit tout l'écoulement). Comme le fluide est supposé incompressible alors la divergence de la vitesse est nulle.

$$\mathbf{div}V = 0 \quad \text{I-6}$$

Remplaçons maintenant la vitesse par son expression en fonction du potentiel, l'opérateur laplacien (application de l'opérateur gradient suivie de l'application de l'opérateur divergence) s'annule, il vient :

$$\mathbf{div}(\mathbf{grad}\varphi) = \Delta\varphi = 0 \quad \text{I-7}$$

Suite à ce raisonnement, on observe que le potentiel est finalement une fonction harmonique des coordonnées.

Une fonction harmonique est une fonction deux fois continûment dérivable :  $f : U \rightarrow \mathbb{R}$  (où  $U$  est un ouvert de  $\mathbb{R}^n$ ) qui satisfait sur  $U$  l'équation de Laplace.

On est ici dans un espace euclidien de dimension 3, le problème consiste donc à trouver toutes les fonctions à trois variables réelles  $\psi(x, y, z)$  qui vérifient l'équation aux dérivées partielles du second ordre :

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = 0 \quad \text{I-8}$$

On simplifie l'équation en introduisant encore l'opérateur laplacien, l'équation aux dérivées partielles précédente devient :

$$\Delta \psi = 0 \quad \text{I-9}$$

On obtient la même équation que précédemment. Cette fonction harmonique des coordonnées va permettre d'obtenir une multitude de solutions exactes ou alors numériques.

Ce problème n'admet pas de solutions simples, on va donc utiliser trois différents types d'approximations :

- Pour les profondeurs relativement importantes par rapport à la longueur d'onde, on utilise les approximations de Stokes qui satisfont l'équation de Laplace.
- Pour les profondeurs plus faibles, on utilise les approximations cnoïdales qui ne satisfont pas l'équation de Laplace.
- Enfin les approximations utilisant la fonction de courant sont relativement identiques aux approximations de Stokes. On les obtient par une méthode de moindres carrés au lieu d'un développement limité.

### ***B) Les approximations de Stokes***

Une fois le potentiel exprimé, on exprime les différentes grandeurs par des développements limités en fonction de la cambrure qui est ici supposée petite. Le développement limité de la fonction harmonique des coordonnées au voisinage d'un point correspond à l'approximation polynomiale de cette fonction en ce point. On écrit donc cette fonction sous la forme de la somme [3]:

- D'une fonction polynôme
- D'un reste qui est négligeable lorsque la variable est suffisamment proche du point considéré.

### ***C) Les approximations en eau peu profonde***

Lorsque la profondeur relative devient inférieure à 1/8 environ, Le développement limité de Stokes perd de sa signification. En effet, dans ce cas-là les crêtes sont très pointues et sont séparées par des creux très étendus. Pour expliquer ce phénomène, il faut utiliser le modèle de la vague cnoïdale, on distingue deux cas précis :

- Quand la hauteur est petite par rapport à la profondeur, on utilise la vague sinusoïdale d'Airy.
- On utilisera au contraire le modèle de l'onde solitaire lorsque la longueur d'onde est grande par rapport à la profondeur. On retiendra que l'onde qui se situe alors entièrement au-dessus du niveau de repos ne présente plus de périodicité.

#### ***D) Les approximations de la fonction de courant***

Le modèle cnoïdal n'est malheureusement pas applicable aux vagues de forte cambrure, dans ce cas, on utilisera la méthode de la fonction de courant qui présente deux principales différences avec les approximations de Stokes [2]:

- Le potentiel est remplacé par la fonction de courant
- Le développement limité classique négligeant les termes d'ordres supérieurs n'est plus appliqué.

On choisit donc le degré de l'approximation puis on détermine les coefficients avec une faible marge d'erreur grâce à la méthode des moindres carrés qui consiste en la comparaison de données expérimentales avec un modèle mathématique censé décrire ces données. Il s'agit de lois de conservation que les quantités mesurées doivent respecter.

Cette méthode permet de savoir qu'une vague de cambrure maximale présente une crête pointue formant un angle de  $120^\circ$ .

### **I.2.2.4- Equations de propagation des vagues**

#### ***A) Relations de propagation des vagues***

Nous allons utiliser le modèle d'Airy pour obtenir une relation de dispersion des vagues. Le modèle d'Airy nécessite plusieurs hypothèses [3]:

- Le fluide est parfait, incompressible et irrotationnel (le rotationnel de la vitesse du fluide est nul).
- La tension superficielle est négligée.
- L'amplitude est très inférieure à la longueur d'onde et très inférieure à la profondeur.

Le modèle d'Airy est donc valable pour les vagues à petite amplitude se propageant dans des milieux à faible profondeur. On réalise un développement au premier ordre des conditions limites de telle sorte que le problème soit linéaire. Ce modèle nous permet de savoir que la

trajectoire des particules d'eau à la surface libre est une ellipse. L'équation de Laplace nous permet d'obtenir pour les longueurs d'ondes supérieures à 30cm la relation de dispersion suivante :

$$w^2 = gk \times \tanh(kh) \quad \text{I-10}$$

Données :

T la période de la houle en s

$w = \frac{2\pi}{T}$  pulsation de l'onde en  $\text{radian.s}^{-1}$

$g = 9.81 \text{ m.s}^{-2}$  : intensité de la pesanteur sur la Terre

L : longueur d'onde de la houle en m

$k = \frac{2\pi}{L}$  : nombre d'onde en  $\text{radian.m}^{-1}$  (nombre de longueurs d'ondes présentes sur une distance de  $2\pi$  unités de longueur)

h : profondeur de l'eau en  $\text{m}^{-1}$

$\tanh$  : fonction tangente hyperbolique (fonction complexe)

La relation de dispersion nous permet d'obtenir la célérité de propagation de l'onde, il vient donc :

$$c = \frac{w}{k} = \sqrt{\frac{g \times \tanh(kh)}{k}} \quad \text{I-11}$$

Comme sur  $\mathbb{R}$  la fonction  $\tanh$  est strictement croissante alors la célérité augmente en fonction de la profondeur. Cela est faux pour les grandes profondeurs, en effet la fonction tangente hyperbolique tend vers 1 donc la célérité des vagues ne dépend plus de la profondeur lorsque  $h \geq \frac{L}{2}$ .

En outre, la relation de dispersion permet de comprendre le comportement des vagues à l'approche du littoral. Il faut tout d'abord savoir que lorsque la profondeur diminue spatialement, la période reste inchangée. Le nombre d'onde va donc augmenter d'après les formules et va entraîner à son tour une diminution de la longueur d'onde donc une diminution de la célérité. Ainsi, les vagues ralentissent et se rapprochent les unes des autres à l'approche du littoral.

On peut obtenir quelques formules simplifiées qui peuvent s'appliquer dans le cas de l'eau profonde :



- La longueur d'onde vaut :  $L \approx 1,6T^2$
- La période vaut :  $T \approx 0,8\sqrt{L}$
- La vitesse de phase en m.s-1 vaut :  $c \approx 1,25\sqrt{L}$

### ***B) La vitesse de groupe des vagues***

La vitesse de groupe des vagues correspond en fait à la vitesse du transport d'énergie. Cette vitesse de groupe varie d'une manière très complexe, on retiendra donc seulement deux cas approximatifs [3]:

- Lorsque la profondeur est élevée, la vitesse de groupe est environ égale à la moitié de la vitesse d'une seule vague. Ainsi les vagues naissant isolément à l'arrière d'un groupe vont le rattraper puis le dépasser.
- Lorsque la profondeur est faible, la vitesse de groupe vaut environ la vitesse d'une seule vague. On dit alors que les vagues ne sont pas dispersives car les vagues isolées se propagent à la même vitesse qu'un groupe.

### ***C) Le mouvement des particules du fluide***

Les particules du fluide décrivent des ellipses presque fermées dans le modèle de la houle d'Airy. Plus l'on descend en profondeur, plus la taille des ellipses diminue car le déplacement d'énergie est beaucoup plus faible en profondeur. L'ellipse la plus grande se situe donc près de la surface du fluide. Le modèle de Gerstner basé sur les hypothèses suivantes propose à la place des ellipses des cercles pour les profondeurs très élevées [2]:

- Le fluide est parfait, homogène et pesant
- Le fond est imperméable et parfaitement horizontal, la pression atmosphérique est constante et il y a une absence de vent
- La cambrure de la vague doit être inférieure à  $1/\pi$ .

Le modèle de Gerstner s'applique surtout pour des vagues à faible amplitude. Dans le modèle d'Airy, les ellipses ne sont pas totalement fermées car d'après la dérive de Stokes, la vitesse d'une particule d'eau est plus importante sous une crête que la vitesse opposée lors du passage du creux suivant. Il existe donc une dérive dans le sens de propagation des vagues qui peut s'inverser en profondeur, cette dérive a une valeur égale à 1,5% de la vitesse du vent en eau profonde.

## **I.3- Energies des vagues**

La puissance considérable des vagues et leur caractère renouvelable en fait une énergie incontournable[5].

### I.3.1- Une énergie marine renouvelable

Dans notre mémoire, la diminution de la quantité d'énergies non renouvelables, c'est-à-dire d'énergies qui ne se renouvellent pas ou pas assez rapidement à l'échelle humaine et qui ne sont donc pas inépuisables, a posé une question existentielle, comment allons nous faire quand les énergies dites non renouvelables seront épuisées ?

C'est pourquoi, depuis les années 90, on a observé un développement des énergies dites renouvelables (EnR). Mais la quantité d'énergie à fournir étant considérable, 12 milliards de tonnes d'énergie en 2008 à l'échelle mondiale, soit 8,4 milliards de TEP pour la consommation finale, les recherches d'énergies renouvelables se font à tous les niveaux, hydroélectricité, éoliennes, hydrolienne, énergie thermique... Une de ces pistes est l'énergie marine renouvelable ou houlomotrice, qui consiste à utiliser l'énergie considérable issue des vagues[5].

### I.3.2- potentiel de l'énergie houlomotrice

L'énergie houlomotrice aurait, selon le conseil mondial de l'énergie, une puissance de 2000 GW soit une production d'énergie de plus de 2000 TWh par an. Cette production pourrait permettre de satisfaire environ 10% des besoins en énergie mondiaux.

En comparaison, les centrales nucléaires ont en moyenne une puissance potentielle de 1100 MW. Il faudrait donc construire plus de 1800 centrales nucléaires moyennes pour avoir une puissance potentielle équivalente à celle de l'énergie houlomotrice.

En France, en 2008, la consommation d'énergie a été de 486,1 TWh et le potentiel d'énergie houlomotrice y serait de 40 TWh/an soit 8,2% de la consommation d'énergie en 2008 de la France [6].

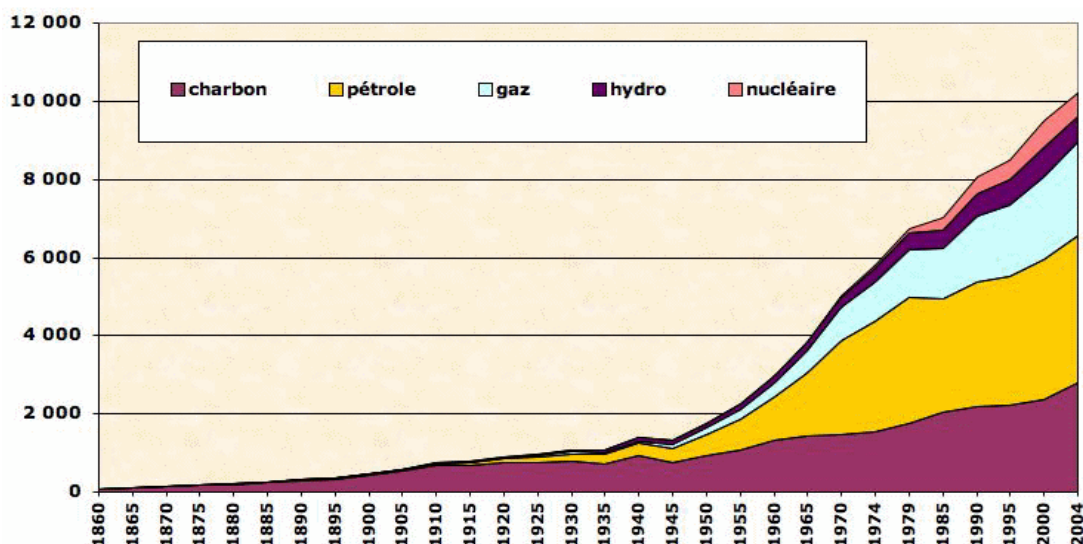
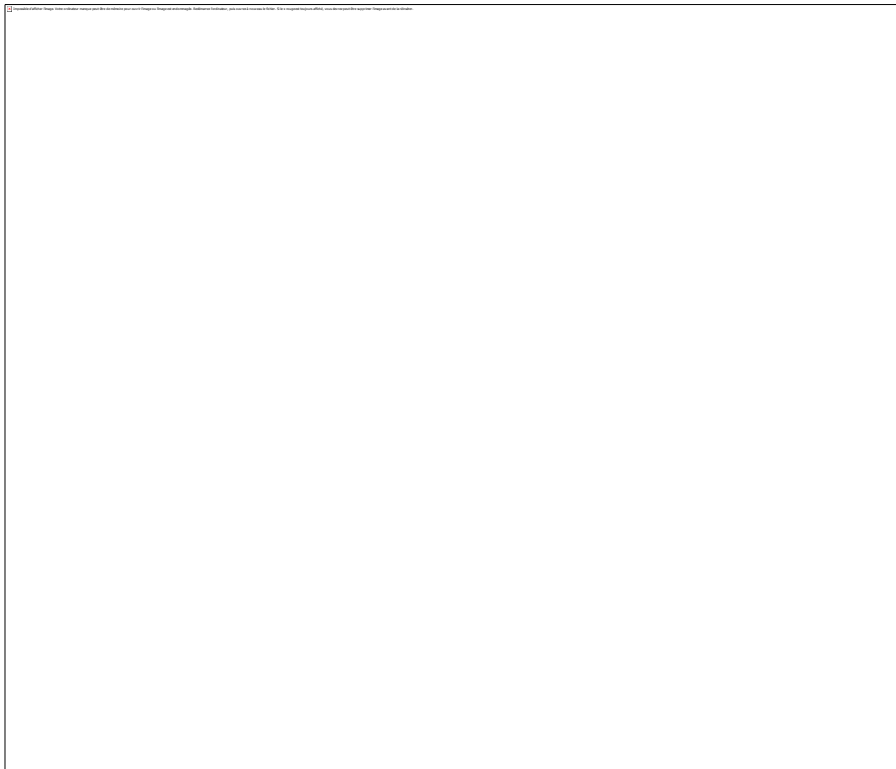


Figure I.15 Production nette d'électricité en France, 1860-2004

### I.3.3- Techniques existantes

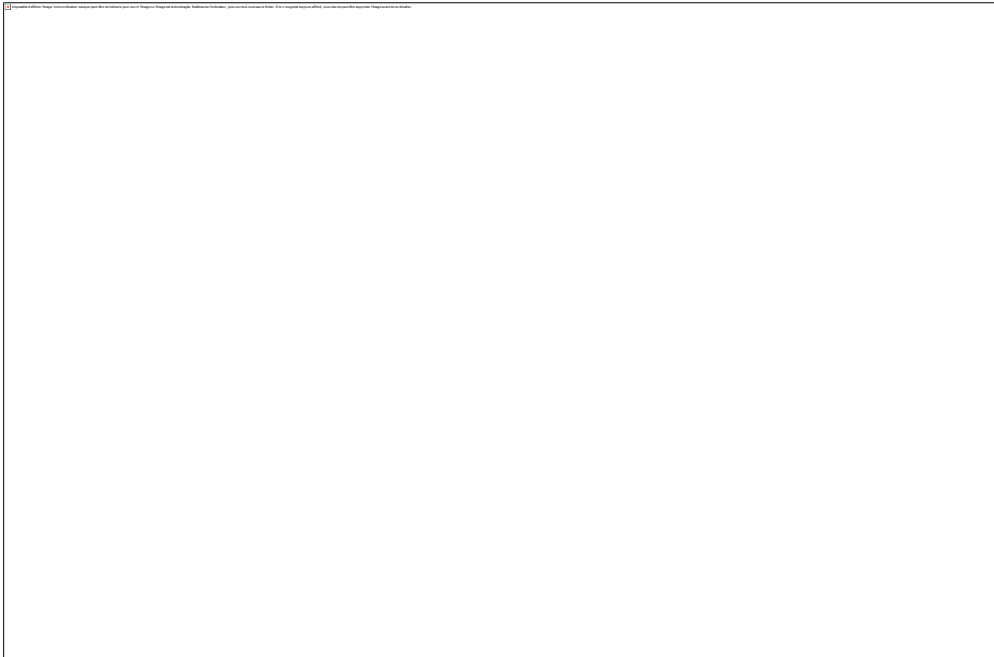
#### A) Systèmes à colonnes d'eau oscillante

Les systèmes à colonne d'eau oscillantes, plus communément appelés OWC (pour Oscillating Water Column ), sont basés sur l'exercice de pression par les vagues sur l'air. En effet, lorsque la vague bouge à l'extérieur de la machine, elle provoque une montée du niveau de la mer dans la chambre qui exerce une pression sur l'air contenu dans la chambre (la chambre étant fermée excepté du côté de l'entrée des vagues et du côté de la turbine ce qui oblige l'air à entrer et sortir par la turbine). Cette pression exercée sur l'air fait tourner la turbine située en haut de la chambre qui fait elle-même fonctionner un générateur. Lorsque l'eau contenue dans la chambre sort, faisant ainsi diminuer la hauteur d'eau dans la chambre et donc la pression sur l'air, ce dernier sort de la turbine, la faisant marcher une deuxième fois. En effet les turbines n'ont pas de sens de fonctionnement, on dit qu'elles sont bidirectionnelles. Les machines peuvent être onshore, c'est-à-dire installées sur la terre ferme, comme les Wavegen ou offshore, c'est-à-dire en pleine mer, par exemple les Oceanlix[5].

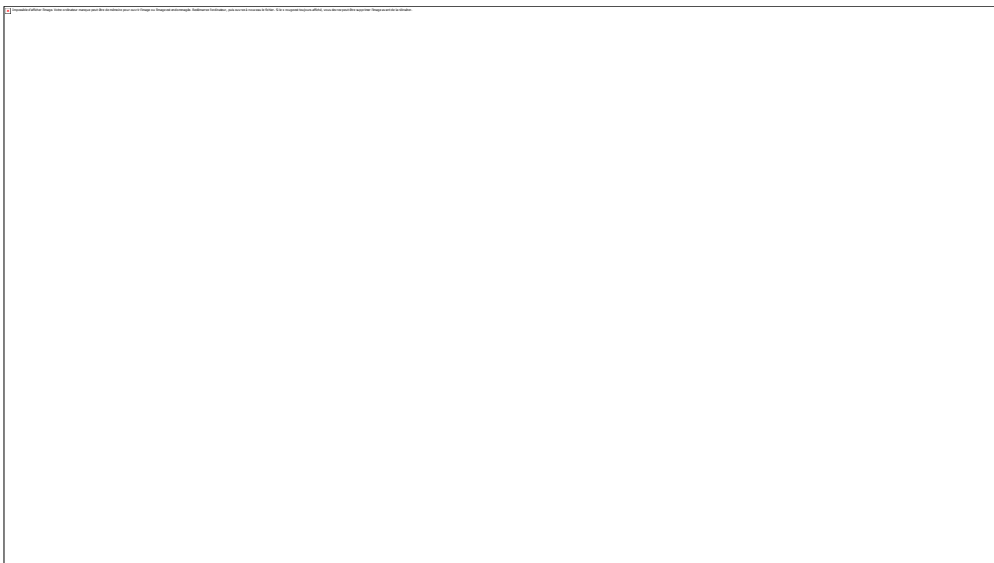


**Figure I.16** Systèmes à colonnes d'eau oscillante

Le potentiel de ces systèmes à colonne d'eau varie, jusqu'alors les turbines Wells de Wavegen ont un potentiel de 250 kW maximum et une unité Oceanlix une capacité nominale de plus de 2,5 MW soit de quoi fournir de l'énergie à 600 foyers. Mais ce ne sont que des prévisions, les vagues n'étant prévisible qu'une semaine à l'avance (maximum).



**Figure I.17** *Oceanlinx à Port Kembla*

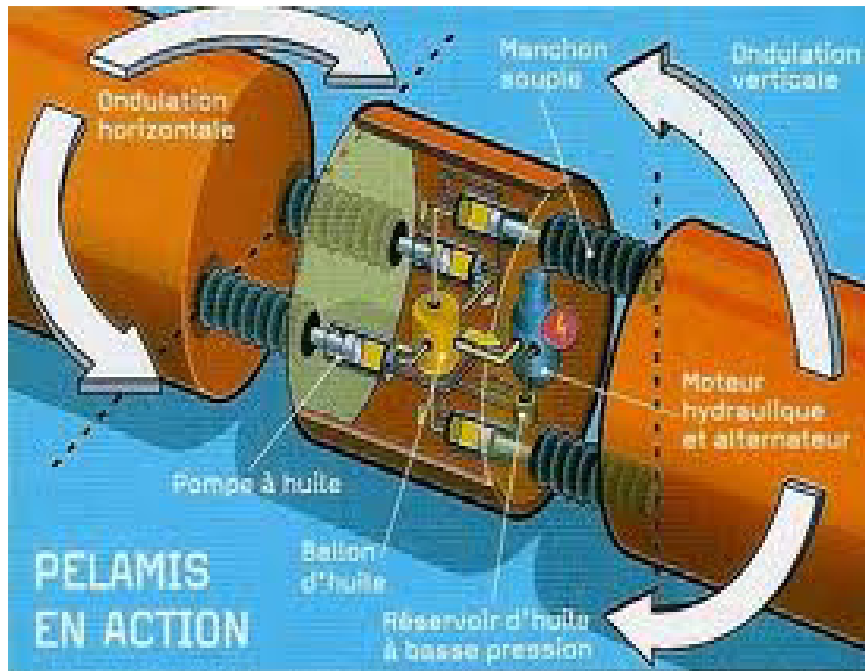


**Figure I.18** *Wavegen de Voith Hydro*

### ***B) Systèmes à rotation flottants***

Les systèmes à rotation flottants sont basés sur des machines flottantes qui se placent perpendiculairement aux vagues et grâce à un système de convection, elles peuvent récupérer l'énergie des vagues. Le seul point commun à ces différentes machines est leur système de convection et le fait qu'elles soient offshore[6].

Prenons par exemple le Pelamis, cette machine est composée de quatre tubes et possède ainsi trois connections (entre les différents tubes). La machine suit le mouvement de la vague et les trois jonctions, qui sont en fait les générateurs des Pelamis, fonctionnent grâce à des systèmes de convection, comme des pistons (voir illustration ci-joint et vidéo : « fonctionnement du Pelamis ») Un Pelamis mesure 140m de long, a un diamètre de 3,50m, une puissance de 750 kW et son espérance de vie est d'une quinzaine d'année. Un Pelamis occupe environ 2,5 ha (0,025 km<sup>2</sup>) de mer.



**Figure I.19** Schéma montrant les constituantes d'un Pelamis

### ***C) systèmes à rotation immergés***

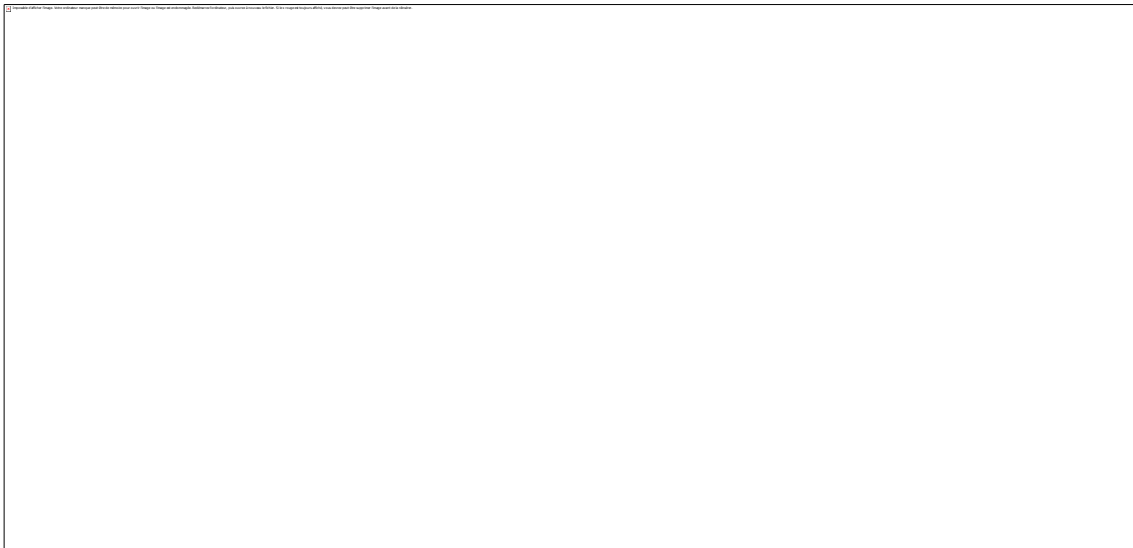
Ces systèmes exploitent la vitesse des particules provenant du mouvement des vagues, c'est-à-dire que lorsque une vague bouge, elle provoque le déplacement de particules d'eau qui acquièrent ainsi une vitesse de déplacement et permettent ainsi de faire bouger la paroi oscillante de la machine. Ces systèmes utilisent donc l'énergie cinétique (énergie que possède un corps en mouvement) des vagues[5].

Un des projets les plus avancés est l'Oyster de Aquamarine Power. En effet deux projets ont déjà vu le jour :

- en 2009, l'Oyster 1 installé à l'EMEC (au Nord de l'Ecosse, à Orkney) d'une puissance de 315 kW (a fonctionné pendant 2 ans et fonctionné presque 24h sur 24h pendant l'hiver soit 6000h)

- en 2011, l'Oyster 800 a été installé en Ecosse à l'EMEC et à 500m des côtes. Il a une puissance de 800 kW, mesure 26 mètre de long et 16 de haut. Son avantage par rapport à son prédécesseur et sa taille plus grande, permettant ainsi de produire plus et le fait qu'il ne repose que sur deux piliers au lieu de quatre, limitant ainsi les fondations.

Un Oyster fonctionne grâce à l'énergie cinétique des particules d'eau contenues dans les vagues, qui plie la paroi oscillante et produit ainsi de l'énergie qui est amené à terre à l'aide d'un câble d'écoulement à haute pression. Une fois plié par une vague, l'Oyster retrouve sa position initiale à l'aide d'un piston.



**Figure I.20** schéma montrant l'organisation d'un Oyster 800

#### ***d) système à franchissement***

Les systèmes à franchissement consistent à faire passer de l'eau à travers une turbine tel un moulin à eau. Ces systèmes peuvent être onshore (SSG: Seawave Slot-coneGenerator) ou encore offshore (WD : wave dragon)[7].

Le Seawave Slot-coneGenerator est une machine qui est composée de trois réservoirs superposés et d'une sortie située en-dessus. L'eau provenant des vagues entre dans les réservoirs à travers trois entrées (une pour chaque réservoir) puis sort en passant dans une turbine à plusieurs étages (c'est-à-dire qu'il n'y a qu'une seule turbine qui fait les trois étages) produisant ainsi de l'énergie. Ces systèmes peuvent être installés sur la côte mais aussi dans des digues (de port par exemple).

Un projet d'une puissance de 150kW est à l'étude en Norvège.

Le Wave Dragon (WD) est un système qui semble plus intéressant que le SSG car ça puissance est plus importante. En effet, bien que le prototype composé de sept turbines, pour

l'instant à l'essai à NisumBredning au Danemark, n'ait qu'une puissance de 20kW, le projet vise à obtenir un système d'une puissance de 4MW soit 27 fois plus que le SSG. Le WD a une forme de U, avec les côtés qui permettent de guider les vagues ; au niveau du bas du U, une montée en pente douce permet de recueillir les vagues sans les casser. Les vagues sont recueillies au niveau du bas du U, dans un réservoir. Du réservoir, l'eau entre dans les turbines, les faisant ainsi fonctionner.

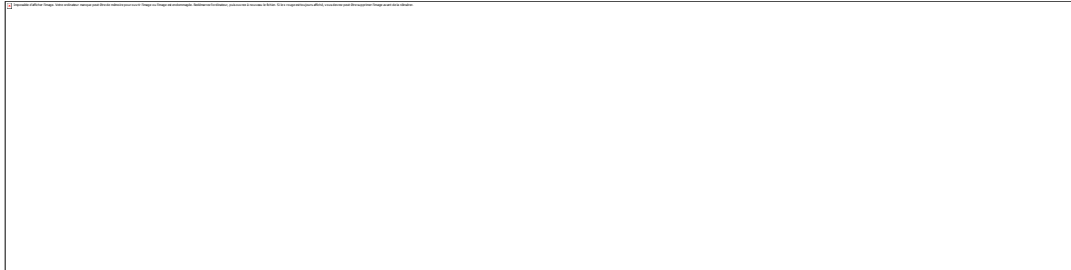


Figure I.21 système à franchissement

### I.3.4- Avantages et inconvénients

#### A)avantages

Les différents systèmes utilisant l'énergie houlomotrice présentent plusieurs avantages par rapport aux énergies qu'elles soient renouvelables ou non-renouvelables.

- les vagues et donc la production des systèmes houlomoteurs sont prévisibles plus d'une semaine à l'avance, contrairement aux énergies utilisant le vent, tel que l'éolienne, dont le vent n'est prévisible que quelques heures avant.
- l'énergie houlomotrice possède un avantage particulier qui est de fonctionner presque en permanence ce qui n'est pas le cas de l'éolienne.
- on peut aussi noter que la forte augmentation de la population mondiale dans les années à venir (environ 9 milliards d'habitant sur Terre en 2050) posera un problème au niveau de l'espace libre. Or la mer est une source d'espace.

#### B) Désavantages

- une grande partie des systèmes houlomoteurs sont offshore et par conséquent difficile d'accès, rendant ainsi plus compliqué et plus cher l'entretien des machines.
- l'installation de tels machines est très couteuse (enfouissement des câbles sous marin, installation de fondations...)
- ces installations peuvent créer une pollution visuelle

-la création de parcs houlomoteurs pourrait avoir des effets sur la faune et la flore ainsi que provoquer le mécontentement des pêcheurs car ces parcs pourraient au contraire créer un abri pour les poissons.

-l'augmentation de la population dans les années à venir augmentera significativement les besoins en énergie rendant ainsi la production d'énergie à partir de l'énergie houlomotrice infime par rapport à la demande.

#### **I.4- Conclusion**

La puissance des vagues a donc des effets importants sur l'environnement, tels que l'érosion de la roche dans le cas de vagues régulières ou la destruction quasi totale de l'environnement touché en cas de tsunami. On a aussi montré que la puissance colossale des vagues peut permettre de produire de l'énergie électrique grâce à l'énergie dites houlomotrice et à des systèmes tels que le « Pelamis » ou le « Wave Dragon ».



# Chapitre Deux

## Récupération de l'énergie des vagues

---

### II.1- Introduction

Les technologies qui permettent de capter l'énergie des vagues ont été mises au point il n'y a que 30 à 35 années. L'Angleterre et le Japon ont été les premiers pays à mettre au point des méthodes pour capter l'énergie des vagues. Aujourd'hui, des entreprises ont construit, ou sont en train de construire, des installations qui convertissent l'énergie des vagues en électricité un peu partout dans le monde. Malgré un potentiel important, la France est pratiquement absente dans ce secteur.

En général, les convertisseurs d'énergie houlomotrice utilisent le mouvement ascendant et descendant des vagues pour produire de l'électricité. Il y a plusieurs types de systèmes. Certains systèmes extraient l'énergie des vagues de surface tandis que d'autres utilisent l'énergie des fluctuations de pression sous la surface de l'eau ou provenant de la vague elle-même. Certains systèmes sont fixes tandis que d'autres suivent le mouvement des vagues.

De très nombreux dispositifs ont été expérimentés avec deux grandes catégories : les dispositifs côtiers et les dispositifs de pleine mer (off-shore). Les premiers utilisent le déferlement des vagues, les seconds utilisent les variations du niveau de la mer lors du passage de la houle. Les dispositifs côtiers sont faciles à construire et à entretenir mais leur rendement est nettement moins bon que les dispositifs off-shore qui exploitent des vagues plus puissantes et plus régulières. Les méthodes les plus couramment utilisées pour capter l'énergie des vagues comprennent : le système à colonne d'eau oscillante, le système à batteurs et le système à canal.

Dans la suite du chapitre, nous étudierons les différentes manières de récupérer l'énergie délivrée par les vagues.

## II.2- 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 [6].

### II.2.1- Principe de fonctionnement

La colonne d'eau oscillante utilise un tube et une structure partiellement submergée, c'est à dire que la colonne est à demi enfoncée dans l'eau. La vague entre dans le tube, ce qui la concentre, augmentant sa hauteur ainsi que la pression exercée par l'eau sur l'air dans la colonne. Les deux bras du tube sont orientés vers l'eau [6].

La colonne est ouverte à la base, pour permettre à la vague d'entrer, et est fermée au sommet pour garder l'air à l'intérieur et sous pression. Elle produit alors de l'électricité en deux étapes :

- Lorsqu'une vague entre dans la colonne, elle pousse l'air qui se trouve dans la colonne fermée au travers d'une turbine, et accroît la pression dans la colonne.
- Lorsque la vague se retire, l'air passe à nouveau dans la turbine en raison de la réduction de la pression d'air du côté de l'océan.

Un alternateur branché à la turbine produit de l'électricité lorsque l'air passe.

L'originalité de la colonne d'eau oscillante vient du fait que le vent qui actionne cette turbine. En effet, le courant d'air qui l'actionne est créé par les vagues.

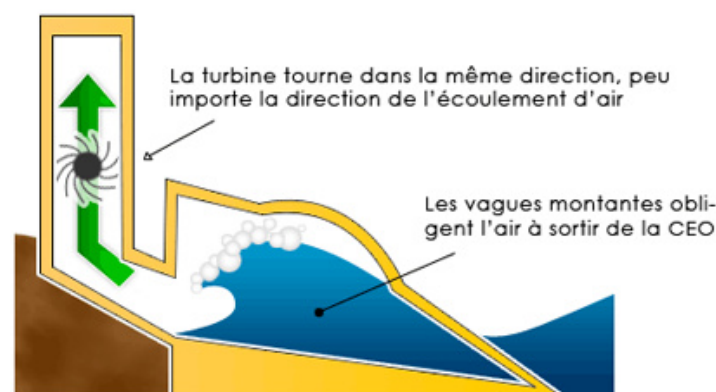


Figure II.1 Colonne d'eau oscillante



Figure II.2 Colonne d'eau oscillante-phase 2

### II.2.2- 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 déterminée 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) [4].

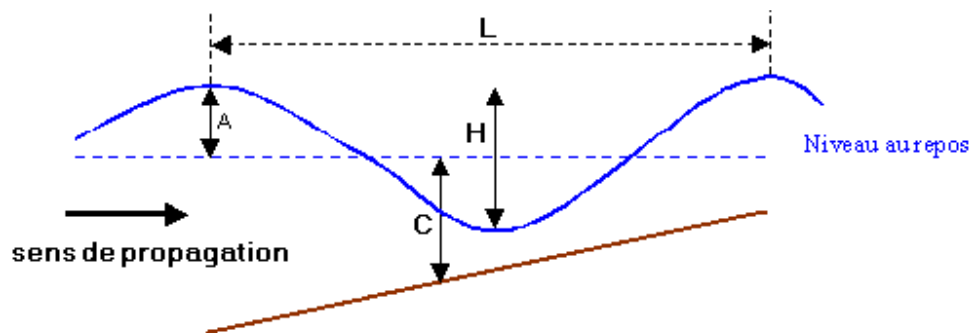


Figure II.3 représentation schématique de la houle

#### Calcul théorique:

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

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

avec « $\lambda$ » la longueur d'onde de la houle et « $g$ » la force de gravité.

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 [3].

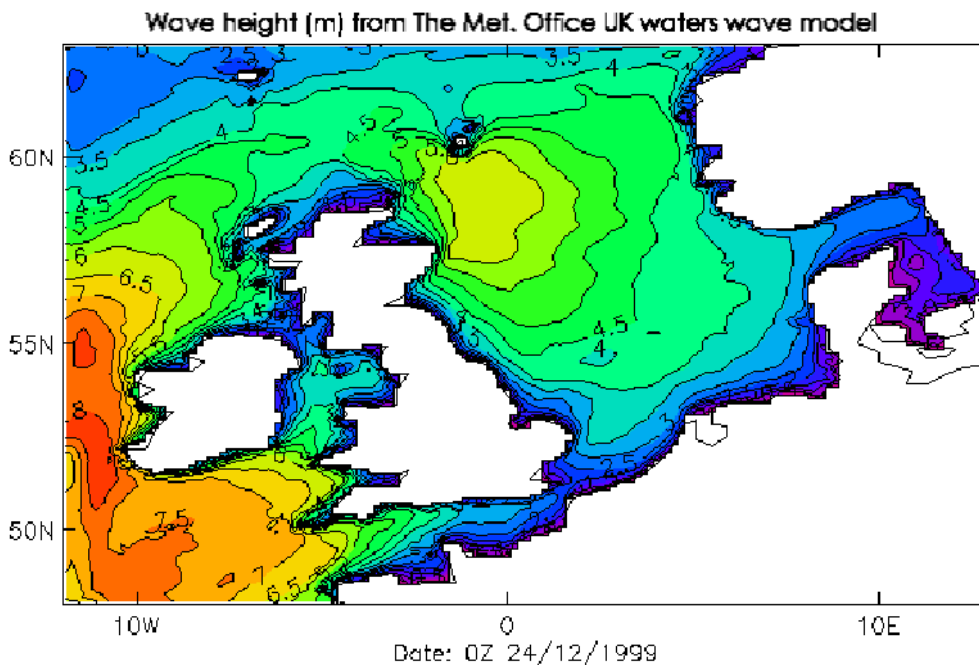


Figure II.4 planisphère d'amplitude de la houle

### II.2.3- 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.5 et 6). Il s'agit de la première utilisation commerciale d'une unité de production de ce type. L'électricité produite est en effet injectée 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 [7].



**Figure II.5** turbine de l'IMPET 500 **Figure II.6** massif en béton comprenant la colonne et la centrale

## II.2.4- 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 dite «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 dégâts 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)



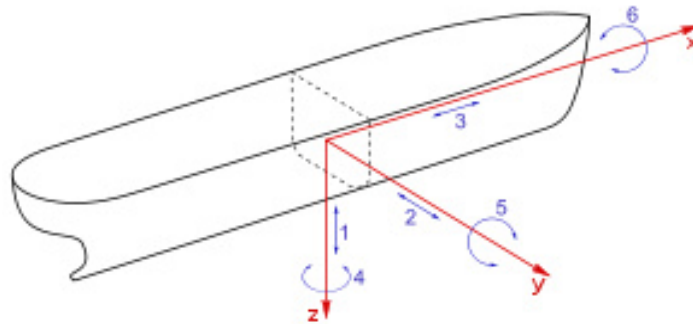
**Figure II.7** centrale à colonne d'eau oscillante Off-Shore

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.3- 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 [8]:





**Figure II.8** Mouvements d'un bateau selon les trois axes: 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.

### II.3.1- Projet prometteur : le Searev

Le SEAREV est un système destiné à la récupérer et à la transformer en électricité [7].

#### - Présentation :

Comme le Pelamis, le Searev sert à produire de l'électricité grâce aux vagues mais il n'est encore qu'un projet du CNRS et de l'école centrale de Nantes et est né du cerveau de l'ingénieur Alain Clément. Son nom Searev signifie : système électrique autonome de récupération de l'énergie des vagues. Une première maquette, douze fois plus petite que l'engin réel, à passée avec succès, en mai 2006, ses premiers essais dans le bassin de l'école centrale de Nantes. Prochaine étape : le prototype grandeur nature qui pourrait prendre ses quartiers en 2009 au large de l'île d'Yeu près de Nantes

Tel un iceberg, Searev ne laissera dépasser hors de l'eau qu'un tiers de ses 15m de hauteur, l'équivalent d'un petit immeuble de cinq étages. Long de 25m il devrait peser au bas mot 1000 tonnes, dont la moitié pour l'énorme roue pendulaire logée au bas du système. C'est grâce à elle que le Searev produira environ 500 kW de quoi alimenter en électricité 200 foyers. 1km<sup>2</sup> de Searev alimenteront plus de 8000 foyers en électricité, l'équivalent d'une ville de 20000 habitants.

**-Fonctionnement :**

*Réservoir d'azote :*

Le gaz qu'il contient maintient en permanence sous haute pression l'huile contenue dans les réservoirs de stockage situés juste en dessous. Ainsi, le moteur hydraulique est alimenté continuellement par de l'huile sous pression, ce qui assure son bon fonctionnement.

*Frein à disque :*

Son fonctionnement est piloté par ordinateur. Relié à des capteurs de mouvements répartis sur le Searev, l'ordinateur détecte toute oscillation du flotteur et de la roue pendulaire. Il actionne le frein à disque quand la roue pendulaire atteint son point le plus haut à chaque rotation. La roue est alors bloquée une fraction de seconde avant de repartir en sens inverse. But de la manoeuvre : accroître au maximum le mouvement de rotation relatif entre le flotteur et la roue pendulaire afin de tirer le maximum d'énergie des ondulations des vagues.

Deux éléments du Searev, le flotteur et la roue pendulaire, sont à l'origine de l'électricité produite par la machine. C'est en effet le déplacement relatif de l'un par rapport à l'autre, sous la poussée des vagues, qui permet de faire tourner un alternateur.

Phase 1

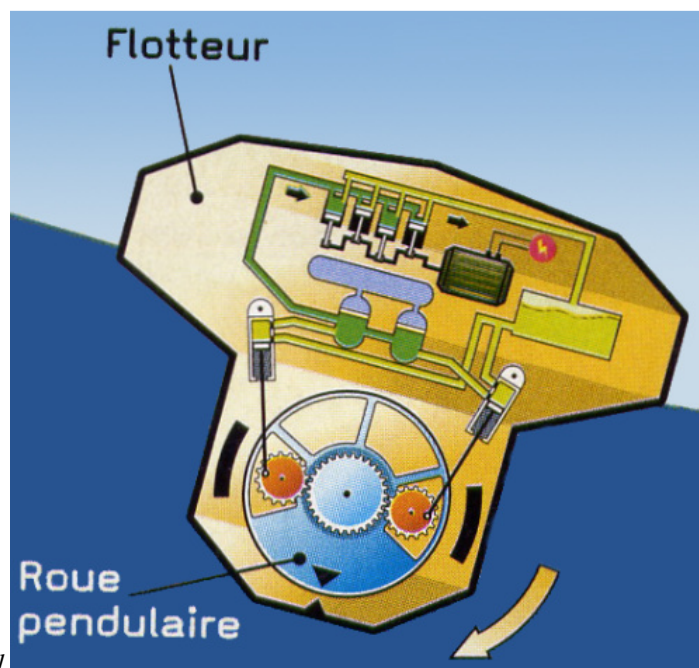


Figure II.9 Searev-phase 1

Une vague fait pencher le flotteur du Searev.



Phase 2

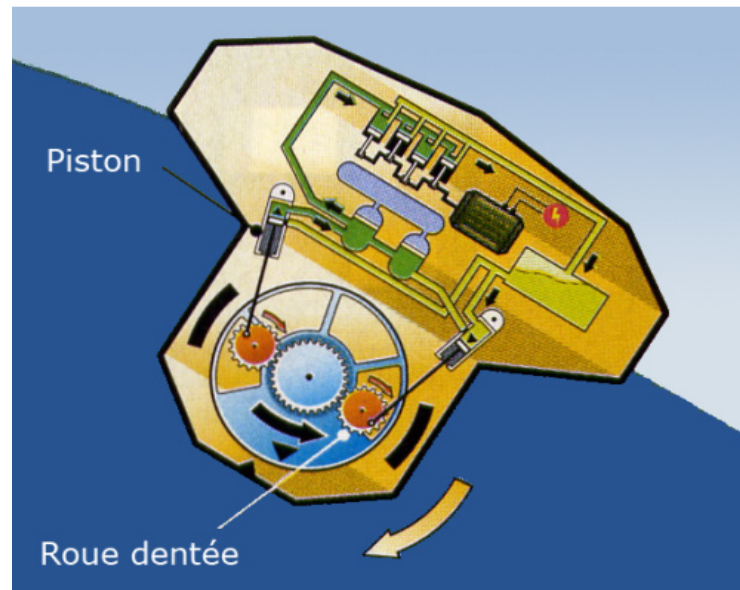


Figure II.10 Searev-phase 2

Ce mouvement provoque en retour la rotation de la roue pendulaire. Entraînée par son poids, elle oscille à l'intérieur du flotteur. Ce faisant elle actionne, par l'intermédiaire de plusieurs roues dentées, des bielles qui mettent à leur tour en mouvement deux pistons. Le piston de gauche monte dans son cylindre tandis que celui de droite descend.

Phase 3

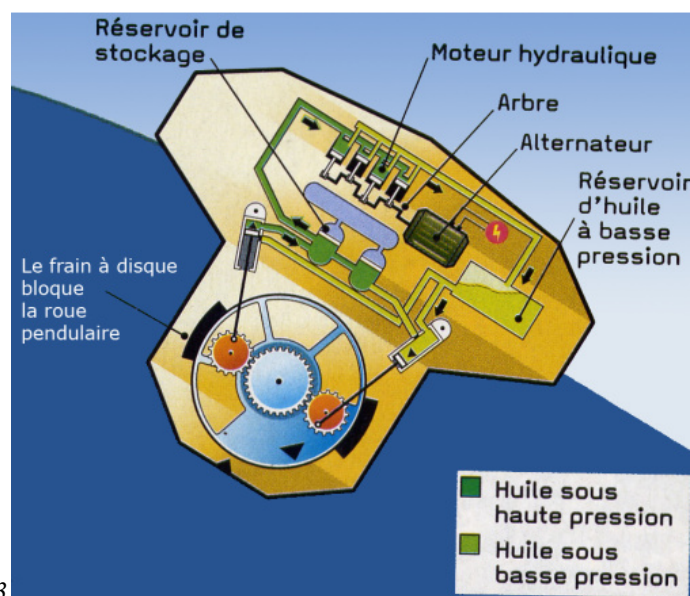


Figure II.11 Searev-phase 3

En montant, le piston de gauche éjecte de l'huile sous pression vers les réservoirs de stockage puis vers le moteur hydraulique du Searev. Celui-ci utilise cette pression pour faire tourner à haute vitesse un "arbre". Cette pièce métallique entraîne un alternateur qui produit du courant électrique. Après être passée dans le moteur hydraulique, l'huile est rejetée dans un

réservoir à basse pression pour être réutilisée dans un nouveau cycle. Pendant que son collègue de gauche monte, le piston de droite descend, libérant un espace dans son cylindre. Ce mouvement aspire l'huile contenue dans le réservoir. Cette huile sera réinjectée dans le moteur lors de la prochaine oscillation de la roue pendulaire. Celle-ci est alors immobile : elle a été bloquée à sa hauteur maximale par un frein à disque contrôlé par ordinateur.

Phase 4

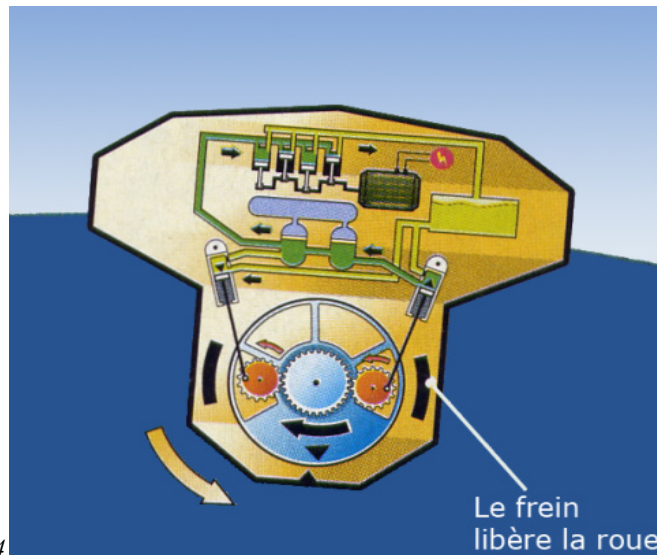


Figure II.12 Searev-phase 4

Le Searev est au sommet de la vague. Le flotteur s'est redressé. L'ordinateur, grâce à des capteurs, a détecté ce mouvement et libéré aussitôt la roue du frein qui l'entravait. Elle oscille alors en sens inverse provoquant cette fois la descente du piston gauche et la remontée du piston droit.

Phase 5

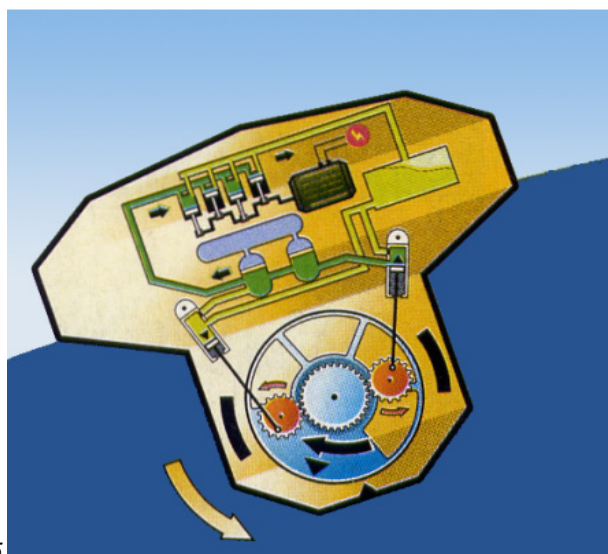


Figure II.13 Searev-Phase 5

C'est le piston droit qui injecte maintenant de l'huile sous pression dans le moteur hydraulique pendant que le piston gauche se remplit d'huile en provenance du réservoir. La roue oscille vers son point haut où elle sera à nouveau fixée par le frein à disque. Elle repartira ensuite en sens inverse avec la prochaine vague, et ainsi de suite.

**Ainsi, le SEAREV offrent 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.

### **II.3.2- Le Pelamis ou serpent des mers**

Cette partie montre le fonctionnement et les caractéristiques du système le plus avancé dans la récupération de l'énergie des vagues [9].

Le pelamis tire son nom d'un monstre marin de la mythologie grecque. Mais avec ce Pelamis pas de danger d'être englouti par un animal marin, car il est destiné à produire de l'électricité grâce à la force des vagues. Le pelamis est développé par l'entreprise écossaise Ocean Power Delivery.



**Figure II.14** *Pelamis*

#### ***Quelques chiffres***

**Longueur :** 120 mètres-**Poids :** 750 tonnes-**Rendement :** entre 70% et 80%

**Caissons :** Nombre : 4-**Longueur :** 24 m-**Largeur :** 3,5 m

**Articulations : Nombre : 3**

**Production :**

**1 pelamis = 750KW** = alimentation en électricité de **500 foyers**.

**1 pelamis en une année = 2.7GW**

**1 km<sup>2</sup> de pelamis** = production de **30 MW** = alimentation en électricité de **20 000 foyers**.

Le pelamis c'est aussi 2000 t par an d'émission de dioxyde de carbone épargnées et 600 t de pétrole d'économisées.

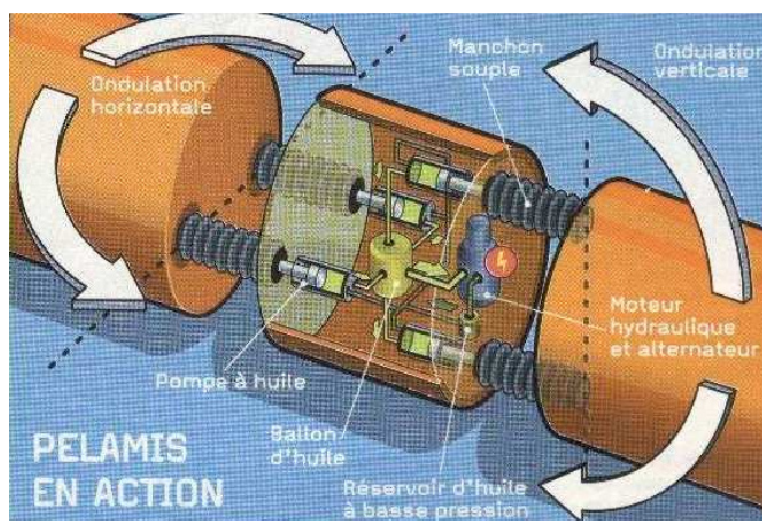
### **- Fonctionnement :**

Le pelamis comprend quatre grands tronçons de 24m de longueur qui sont séparés par trois cylindres beaucoup plus petit mais c'est là que se produit l'électricité.

Les mouvements des vagues font jouer les articulations du serpent qui ondule autant à la verticale qu'à l'horizontale. Des axes, placés au niveau des articulations et protégés de l'eau par un manchon souple, se déplacent au rythme des ondulations et actionnent des pompes à huile. Les pompes mettent sous pression de l'huile dans un grand ballon, puis l'huile est lâchée en continu sur un moteur hydraulique qui entraîne un alternateur pour produire de l'électricité, celle-ci descend ensuite le long d'un filin jusqu'au câble sous-marin principal et le bord de côte, où il est raccordé au réseau électrique.

Grâce à son système d'ancrage flexible, qui tire la pointe avant de l'engin vers le bas et le force à rester face aux vagues tout en lui laissant assez de mou pour pouvoir se balancer, le rendement énergétique du Pelamis est quasi constant. Compris entre 70 % et 80 %.

A partir d'une station la machine peut être commandée. Il est possible de faire remuer d'avantage le Pelamis dans les petites vagues pour maximiser l'énergie et, à l'inverse, limiter ses mouvements dans les grosses vagues pour limiter les risques de casse.



**Figure II.15** 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.

**- L'installation du pelamis au Portugal :**

Officiellement lancé le 14 mai 2006, le projet d'installer des Pelamis sur les côtes portugaises a été présenté à plusieurs responsables politiques portugais avec l'ambition, pour ses promoteurs, de créer à terme un cluster industriel pour l'énergie maritime au Portugal.

Les trois convertisseurs "Pelamis" commandés par le Portugal ont d'abord été envoyés sur le chantier naval de Peniche, un des plus grand port du pays au nord de Lisbonne. Ces trois convertisseurs permettent de produire 2,25 MW d'électricité à partir de la houle pour alimenter 1500 foyers. Leur installation en mer, à 5 km des côtes de Póvoa de Varzim au nord du Portugal s'est faite au mois d'août.

L'investissement, majoritairement privé (75%), représente 8,5 millions d'euros pour ces trois premiers convertisseurs. Le coût de cette énergie renouvelable a d'ores et déjà été fixé à 248 euros le MW/h.

Energis, le producteur portugais d'énergies renouvelables, prévoit ainsi de commander trente unités supplémentaires du générateur "Pelamis" pour atteindre une production électrique de 20 MW d'ici 2008, représentant un investissement global de 70 millions d'euros. Selon l'entreprise, la création d'un cluster dans ce domaine pourrait avoir une ampleur considérable : près de 40 000 emplois pourraient être créés au Portugal pour répondre à une partie des attentes d'un marché mondial estimé à environ 325 milliards d'euros.



**Figure II.16** Construction du Pélamis

L'accueil du public à cette énergie du futur c'est plutôt bien passé. Les surfeurs ne la voient pas d'un mauvais oeil, dans la mesure où les machines seront installées loin de la grève. L'Association des armateurs de pêche du nord du Portugal n'aurait pas montré d'hostilité, car il n'est pas coutume de pêcher dans les zones où sont installés les Serpents.

En revanche, les navigateurs réclament une claire signalisation des sites, afin d'éviter les risques de collision. Quant aux organisations de défense de l'environnement, elles font partie de la commission de suivi du projet au Portugal. Pour l'instant, les principaux obstacles à son développement sont donc davantage technologiques et financiers. Le lancement de Pelamis est donc suivi avec beaucoup d'attention.

L'exemple du Pelamis a permis à des projets qui avaient été mis à l'abandon ou qui ne trouvaient plus de soutien financier de se réveiller.

## II.4- Système Archimedes wave swing (AWS)

### II.4.1- 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 [9].

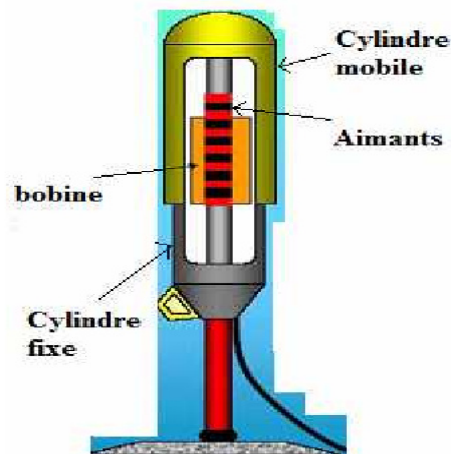


Figure II.17 système à piston flottant

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.

## II.4.2- Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement est relativement simple, comme son nom l'indique le système Archimedeswave 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. A 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 [9].

## II.4.3- 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

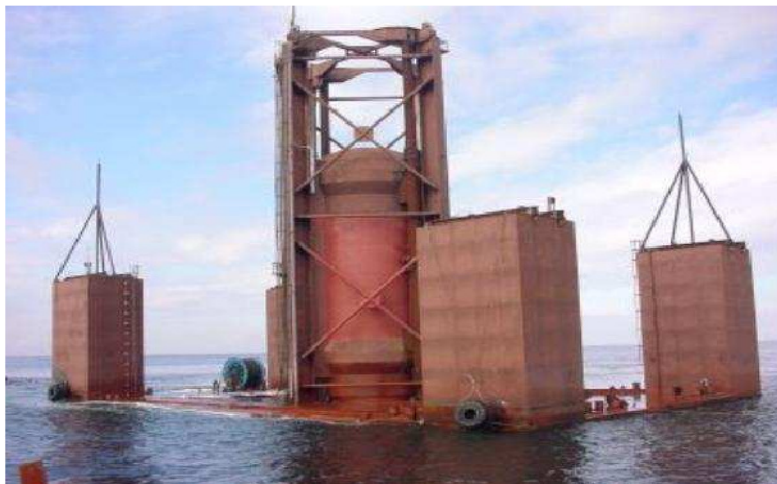
Un autre avantage de cette installation immergée est l'absence d'impact visuel. L'AWS n'est pas équipé d'élément rotatif bruyant. L'impact environnemental est donc négligeable. L'impact visuel est non existant.

#### 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.

### **II.4.4- 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 [8].



**Figure II.18** On peut voir la station de production AWS MK 1 avant immersion, développée par la société AWS oceanenergy, immergée au large du Portugal en 2004, on a enregistré une production maximale de 1,5 MW.

### **II.4.5- 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

## II.5- 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 [9].

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.

### II.5.1- Les systèmes à déferlement situés sur les côtes

#### a) le Tapchan

##### - Historique :

Le « TAPeredCHANnel » 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.

##### - Principe :

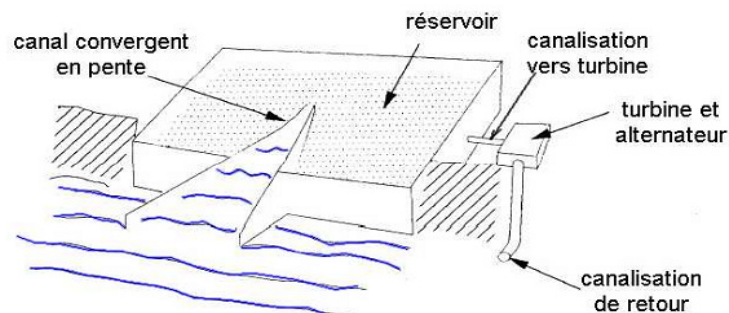


Figure II.19 Principe du système à déferlement Tapchan

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 contenue dans les vagues est ainsi piégée et est transformée en électricité en passant dans une turbine de type Kaplan.

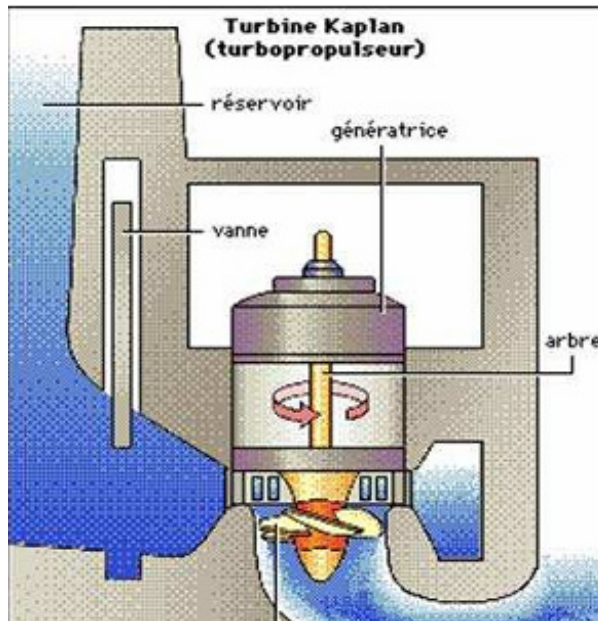


Figure II.20 Turbine Kaplan

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

- Caractéristiques :

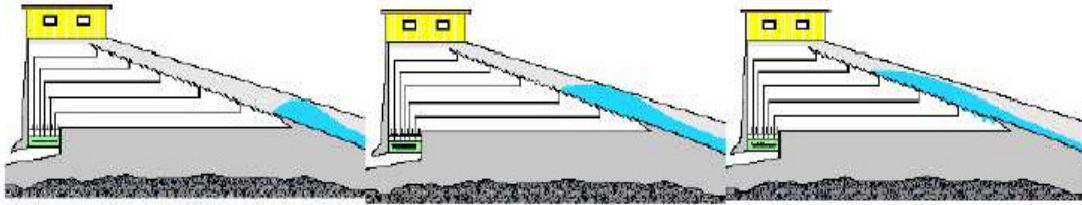
La qualité du remplissage du bassin dépend de la hauteur des vagues relativement à celle de la rampe de déferlement, mais également des effets de marées. Des solutions plus récentes permettent de mieux s'adapter à la hauteur de la houle en exploitant une rampe de déferlement incluant un système de captage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

**b) Seawave Slot-cone Generator**

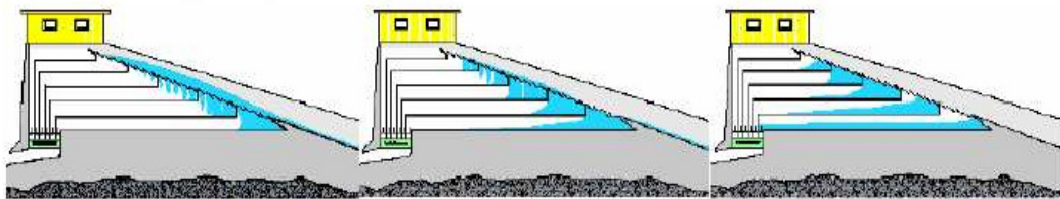
- Historique:

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 %.

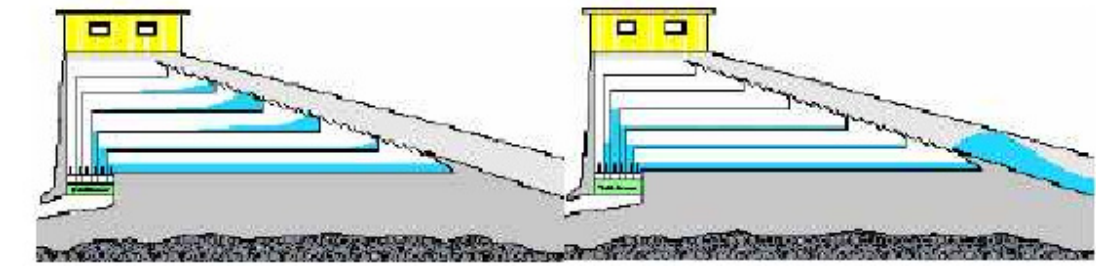
- Principe:



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 II.21** *Système Seawave Slot-cone Generator*

## II.5.2- 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 NissumBredning. 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 m<sup>3</sup>. 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 [9].



Figure II.22 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.

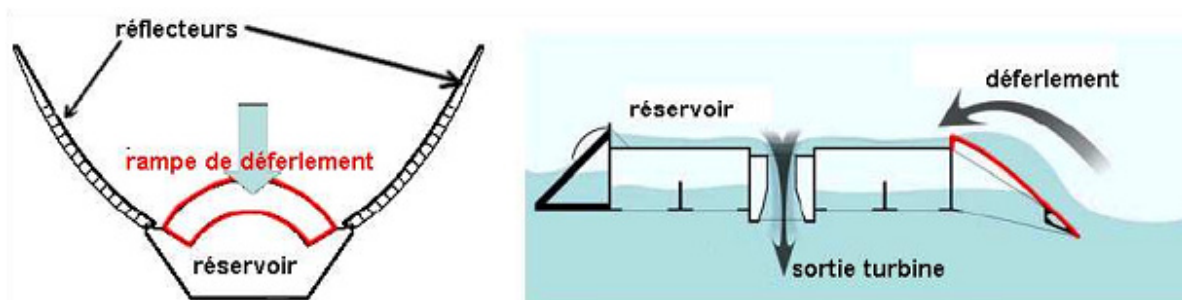


Figure II.23 Vues de dessus et de profil du système flottant Wave Dragon

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 :

*o 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 m<sup>3</sup>.

*o 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).

*o 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.

## **II.6- Les autres projets exploitant les vagues**

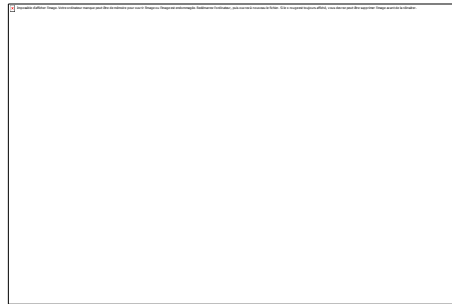
Cette partie mis à jour régulièrement regroupe tout les systèmes créés ou en projet pour récupérer l'énergie libérée par les vagues[8].

Au cours des dernières décennies, un grand nombre de concepts de systèmes récupérateurs d'énergie des vagues a été développé, notamment en Europe. Si certains systèmes sont aujourd'hui parvenus à maturité, avec la mise en place de prototypes et quelques connexions au réseau, on reste encore loin de la phase de production. La grande diversité des procédés envisagés, tous à des stades plus ou moins avancés de développement, le grand nombre de critères à prendre en compte : variabilité de la ressource, conditions environnementales extrêmes, impact social et environnemental, font qu'il est très difficile, à l'heure actuelle, d'évaluer le rendement et la viabilité de ces dispositifs.

Deux points apparaissent importants pour garantir le développement de la filière « Energie des Vagues » et en assurer la crédibilité auprès des investisseurs et industriels. Tout d'abord, les systèmes de récupération de l'énergie des vagues doivent faire la preuve de leur efficacité. Compte tenu du grand nombre de concepts développés à ce jour et n'ayant pas encore été véritablement évalués, il convient de mettre en place des moyens et procédures standardisés d'évaluation permettant de quantifier le rendement réel des systèmes et de les comparer.

- **Waveplane ou Avion des vagues**

Le Waveplane utilise la crête des vagues qui sont coupées par la forme de l'engin, puis coulent dans des tubes d'inertie qui entraînent des turbines et produisent donc de l'énergie. On estime que 25% de l'énergie des vagues peut être convertis en électricité. Le Waveplane a été testé au Danemark et au Japon, en bassin et en mer.



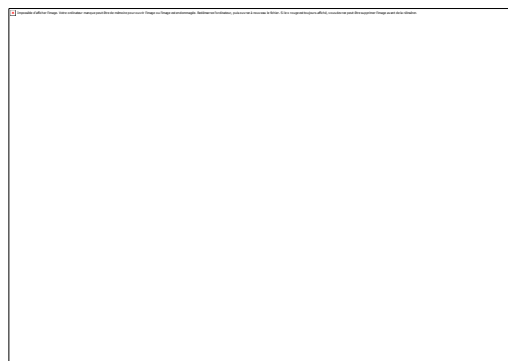
**Figure II.24** Waveplane

La vague frappe la plage artificielle formée par le Waveplane, puis l'eau des vagues rentre dans un tube et actionne des turbines et produit de l'électricité.

- **Limpet ou Wavegen**

Le limpet fonctionne depuis 2000, il est installé sur le littoral écossais. Il produit 500KW et fournit 400 foyers en électricité. La turbine de ce système est actionnée par air comprimé par la montée et la redescende de l'eau de mer dans une chambre étanche, sous l'effet de la houle. Le Limpet utilise le principe de la colonne d'eau oscillante et sa turbine a été développée pour tourner dans le même sens, indépendamment du sens d'entrée de l'air, maximisant la capacité de production.

Sa position sur le littoral permet un accès facile aux techniciens et le prix du KW est faible mais le limpet a une faible capacité de production.

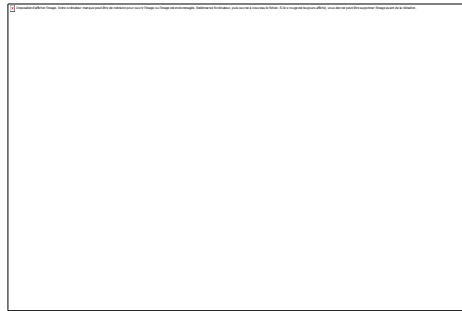


**Figure II.25** Limpet



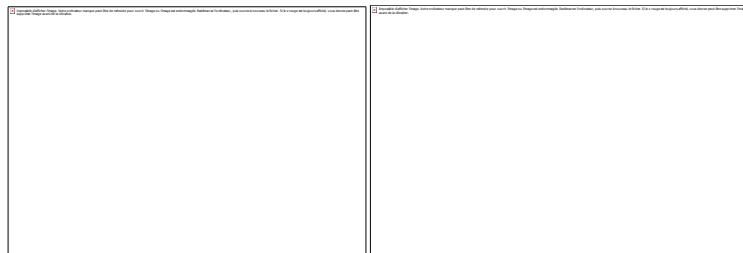
- **Oweco**

L'entreprise Oweco (OceanWaveEnergycompany) située aux Etats-Unis à Bristol, présente son projet de convertisseurs d'énergie des mers, constitué d'un flotteur soumis au mouvement des vagues en surface, relié par un tube coulissant dans un cylindre à un second flotteur fixé au fond de l'eau.



**Figure II.26***Oweco*

- **Energetech**



**Figure II.27***Energetech* **Figure II.28***Energetech-Croquis*

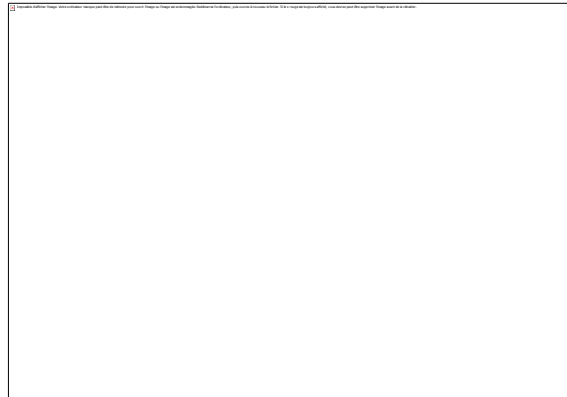
Le projet Energetech australien utilise un système qui concentre les vagues jusqu'à la turbine qui convertira leur énergie en électricité. Il y a un mur parabolique pour concentrer l'énergie des vagues sur le collecteur et améliorer l'économie du dispositif.

- **AquaBuoy ou IPS OWEC Buoy**

**Figure II.29***AquaBuoy/Owec*

La firme Interproject Service présente son OWEC Buoy ou AquaBuoy, qui fournit de l'énergie par compression verticale de deux pistons. Un peu comme le Pelamis (voir plus haut), qui lui fonctionne horizontalement en surface. Un seul engin peut fournir de 50KW à 150KW, cela peut paraître peu mais l'AquaBuoy est beaucoup plus petit et moins cher que ces concurrents.

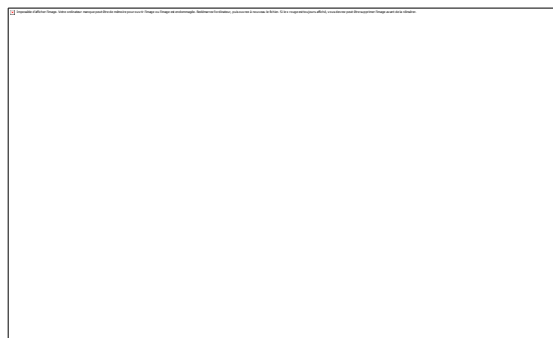
- **Wavebob**



**Figure II.30** *Wavebob*

Le Wavebob, repose sur le mouvement d'une bouée sous l'effet des vagues. Ce convertisseur d'énergie des vagues est développé dans le cadre du programme européen Eureka WWEC. Le principe de fonctionnement est le même que l'AquaBuoy.

- **Orecon**



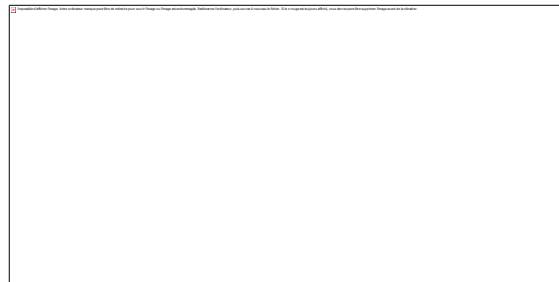
**Figure II.31** *Orecon*

Orecon une société partenaire de l'Université de Plymouth, travaille sur le projet d'une centrale qui utilise le concept de multiples colonnes d'eau (multiple oscillating water column, MOWC) pour produire de l'énergie. Après avoir fait des essais avec des modèles réduits, Orecon travaille maintenant sur un projet à échelle réelle ayant une capacité de production de 1MW par unité pour démontrer la rentabilité commerciale des MOWC. Cette unité a été construite sur la



côte anglaise en 2006, et une vingtaine d'autres unités devraient voir le jour d'ici 2010. Le principe est basé sur une colonne d'eau oscillante sans fond dans laquelle les vagues s'engouffrent par le bas, emprisonnant l'air qui s'échappe vers le haut en actionnant une turbine. Pour être efficaces, ces colonnes d'eau doivent s'adapter aux différentes fréquences des vagues et utiliser l'énergie de ressac.

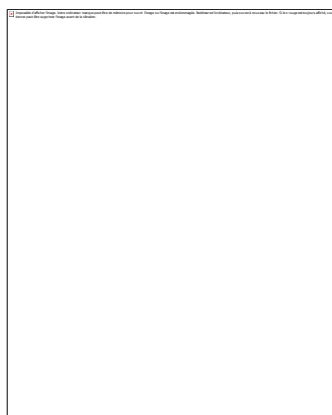
- ***Plate-forme PSP***



**Figure II.32***PSP*

FloatIncorporated développe une plate-forme en mer à stabilisation pneumatique PSP (Pneumatically Stabilized Platform). Elle est constituée d'un grand nombre de structures cylindriques placées côte à côte qui sont fermées uniquement sur leur partie haute, donc l'eau est présente dans leur partie basse, et grâce à une ouverture entre les cylindres, lorsque l'eau monte dans l'un d'eux, il se crée un flux d'air entre les cylindres qui stabilisent la plate-forme et peut servir à produire de l'énergie. La plate-forme avait été conçue à l'origine pour accueillir des ports ou des aéroports flottants, la production d'énergie servant à rendre autonome la plate-forme. Il est maintenant envisagé de fabriquer cette plate-forme uniquement pour produire de l'énergie. Le seul inconvénient est que l'on ne peut pas réaliser de modèle réduit, il faut faire des tests en taille réelle.

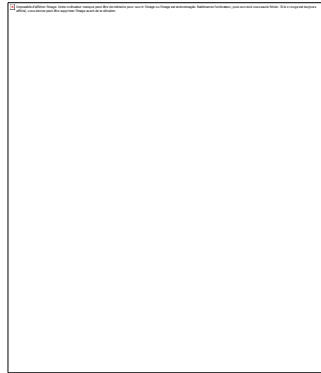
- ***Seavolt***



**Figure II.33***Seavolt*

Le Seavolt est une bouée qui bouge de haut en bas avec le mouvement des vagues, actionnant une pompe hydraulique et générant ainsi de l'énergie. C'est le même principe que le Searev.

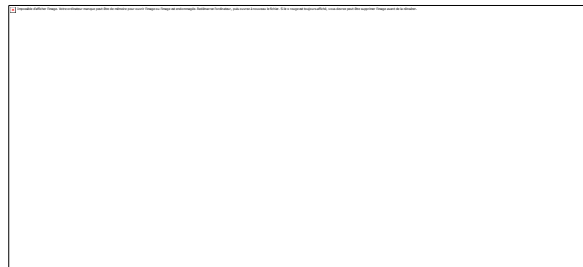
- ***PowerBuoy***



**Figure II.34** *Powerbuoy*

Une dizaine de mini centrales électriques, des bouées géantes, vont être déployées par Ocean Power technologies. ces PowerBuoy, immergées de quelques mètres sous la surface des flots, font monter et descendre un piston avec la houle, générant du courant électrique au rythme des vagues, soit au gré des conditions de la mer, durant 90 % du temps.

- ***SSG***



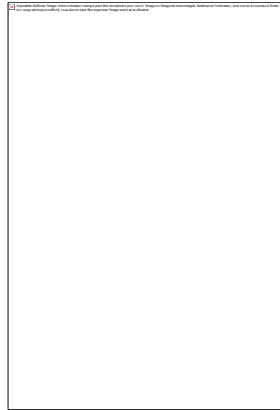
**Figure II.35** *SSG*

La firme norvégienne Bølgekraftverk a mis au point le SSG, qui est en fait un mélange de plusieurs techniques. L'eau, par le mouvement des vagues, monte sur la structure puis tombe dans des colonnes qui finissent par des turbines à eau.

- ***MightyWhale***

Le mightywhale, créé au Japon, fonctionne par la compression de l'air par le mouvement des vagues, puis passage de cet air dans une turbine qui transforme ce mouvement en électricité.

- **Wave Swing**



**Figure II.36** *Wave Swing*

Le Wave Swing fonctionne comme le PowerBuoy ou le Wavebob mais contrairement à eux il est totalement immergé.

## **II.7- Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons étudié les différentes méthodes et technologies pour capter les récupération de l'énergie des vagues (houlomotrice). Aujourd'hui, des entreprises ont construit ou sont à construire des installations qui convertissent l'énergie des vagues en électricité en Écosse, au Portugal, en Norvège, aux États-Unis, en Australie, en Inde et en Chine.

En gros, les convertisseurs d'énergie houlomotrice utilisent le mouvement ascendant et descendant des vagues pour produire de l'électricité. Il y a plusieurs types de systèmes. Certains systèmes extraient l'énergie des vagues de surface tandis que d'autres utilisent l'énergie des fluctuations de pression sous la surface de l'eau ou provenant de la vague elle-même. Certains systèmes sont fixes tandis que d'autres suivent le mouvement des vagues. Les méthodes les plus couramment utilisées pour capter l'énergie des vagues comprennent :

- le système à colonne d'eau oscillante;
- le système à piston flottant;
- le système à canal.

Dans le chapitre suivant on s'intéresse au convertisseur d'énergie de vague d'océan (OWEC : ocean wave energy converter) et nous allons étudier leur simulation numérique dans le but de mieux comprendre le système choisie.

# Chapitre Trois

## Convertisseur d'Énergie de Vague d'Océan : Ocean Wave Energy Converter (OWEC)

---

### III.1- Introduction

La houle des océans représente une ressource énergétique énorme, dans cette chapitre nous avons cherché à utiliser ce ressource d'expertise pour développer des systèmes novateurs de production d'énergies renouvelables marines.

Une bouée en surface, un mécanisme sous-marin, les bouées marémotrices pourraient passer pour des bouées de sécurité délimitant une zone de baignade, mais il n'en est rien.

Les bouées marémotrices sont composées d'un flotteur en surface et d'un système sous l'eau, servant de générateur. Alors que la bouée flotte doucement, elle se laisse porter au gré des marées et des vagues, reliée au générateur sous-marin. La force des vagues et des marées fait bouger la liaison de haut en bas, jusqu'à activer un système générateur d'électricité.

Le bouée marémotrice, utilise une unité génératrice d'électricité à aimants, aimants qui réagissent avec des bobines de fil conducteur statique. L'interaction de plusieurs types d'aimants, de ce générateur et des mouvements de la bouée provoquent des impulsions électriques.

D'autres systèmes, comme celui de AWS Ocean Energy, utilisent également des bouées sous-marines qui, en subissant la pression de la masse d'eau lors des vagues, s'enfoncent selon un axe vertical et provoquent un mouvement qui active une pompe, la pompe produisant alors de l'énergie.

Il s'agit plutôt de jouer sur les différences de pression dans l'eau plutôt que du mouvement même des vagues.

### III.2- Analyse du bouées génératrices d'électricité

Dans cette partie, nous allons présenter les relations de base des vagues de l'océan et la théorie des vagues linéaire, les propriétés des vagues sont mathématiquement formulées, les conditions aux limites sont expliquées, puis transfert d'énergie par les vagues progressives est

expliqué très brièvement, l'équation de l'énergie produite par les vagues et la puissance absorbée par les dispositifs OWEC est présentée. Ensuite, dans ce partie propose des méthodes système CFD (Computational fluid dynamics) et des organisations s'appuyant sur le système OWEC, l'algorithme général avec un exemple spéciale des systèmes OWEC et les conditions de vagues est présenté en été.

### III.2.1- la théorie linéaire des vagues

#### III.2.1.1 les équations qui régissent

Les relations physiques et les propriétés des vagues doivent être soigneusement étudiés avant la conception du système OWEC commence,

#### *Propriétés des vagues de l'océan*

Une vagues dont la crête se déplace dans une direction parallèle à la ligne de flottaison toujours ce qu'on appelle une vagues progressive. La vitesse de phase de vagues est appelée célérité et est donnée par [10],

$$C = \frac{L}{T} \quad \text{III-1}$$

l'étude est limitée à vagues progressives parce que les vagues de la mer ouverte sont des vagues progressives.

L'eau peut être considéré comme incompressible, visqueux et irrotationnel dans le but de l'étude. Si l'analyse bidimensionnelle est considéré, une grande simplification est observée dans les dérivations. Nous commençons avec les équations de Navier-Stokes [11, 12]

$$\frac{D\vec{u}}{Dt} = \vec{F} - \frac{\nabla p}{\rho} + \nu \nabla^2 \vec{u} \quad \text{III-2}$$

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad \text{III-3}$$

La densité de l'eau  $\rho$  est supposée être constante. La viscosité est négligée. En outre, on peut supposer que, sous l'influence du mouvement des vagues, les particules se déplacent sur une trajectoire courbe et ils ne tournent pas autour de leur axe. Les particules d'eau sont supposés être à l'arrêt au début et passer par des forces normales exercées par les vagues.

Si  $u$  et  $v$  sont les vitesses des vagues dans le sens  $x$  et  $y$ , alors simplifiée équation de continuité pour les deux dimensions deviennent [10],

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad \text{III-4}$$

Aussi  $\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}$  [10] de plan  $x$ - $y$  d'intérêt est supposé être égal.  $\phi$  est le potentiel de vitesse.

L'équation d'onde progressive est donnée par [10],

$$\phi = A \cosh k(z + h) \cos(kx - \omega t) \quad \text{III-5}$$

$A$  est constante et  $\phi$  est le potentiel de vitesse.

$a$  (amplitude de l'onde),  $k$  (nombre d'onde),  $c$  (célérité) et  $h$  (profondeur de l'eau) sont des constantes.

Les constantes  $a$ ,  $k$ ,  $c$  et  $h$  représentent les propriétés des ondes et doit être déterminé.

La constante  $k$  peut être déterminé à partir de la périodicité des vagues [10].

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{kc} \quad \text{III-6}$$

La longueur d'onde  $\lambda$  des ondes en eau profonde est donnée par [10]

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \quad \text{III-7}$$

L'eau est considérée comme l'eau profonde, si la profondeur de l'eau est au moins la moitié de la longueur d'onde.

$$h \geq \frac{\lambda}{2} \quad [8] \quad \text{III-8}$$

On peut observer qu'aucune particule d'eau peuvent traverser le fond de la mer [10].

$$v = \frac{\partial \phi}{\partial y} \Big|_{y=h} \quad \text{III-9}$$

À la surface de l'eau, on peut supposer qu'aucun particules peuvent traverser la surface libre [10].

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial \phi}{\partial y} \Big|_{y=0 \text{ or } \eta} \quad \text{III-10}$$

La pression à la surface libre (jauge) est égal à zéro. La tension de surface est négligée. L'équation dynamique de pression est obtenue par la conservation de l'impulsion donnée par [10].

$$\frac{P}{\rho} + \frac{1}{2} \rho^2 + gy + \frac{\partial \phi}{\partial t} = 0 \quad \text{III-11}$$

$P = 0$ , pression manométrique et  $\rho^2$  est négligée que les vitesses des vagues sont petites [10].

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = -g\eta \Big|_{y=\eta} \quad \text{III-12}$$

$$\eta = -\frac{A}{c} \sinh kh \sin(k(x - ct)) \quad \text{III-13}$$

La condition limite de surface est obtenue en combinant les équations [10].

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \phi}{\partial y} = 0 \Big|_{y=\eta=0} \quad \text{III-14}$$

La célérité de la vague peut être obtenue en différenciant l'équation d'onde progressive par rapport à  $t$  et  $y$  [10].

$$c = \sqrt{\frac{g}{k} \sinh kh} \quad \text{III-15}$$

L'amplitude de l'onde est donnée par [10].

$$a = -\frac{A}{c} \sinh kh \quad \text{III-16}$$

### ***Masse, le quantité de mouvement et le transfert d'énergie par vagues progressives***

Les particules d'onde se déplacent dans le chemin circulaire en raison des forces exercées par les vagues. Il est intéressant de comprendre comment la masse, le quantité de mouvement et l'énergie est transférée par les vagues, les vagues progressives parcourir de longues distances avec peu de perte d'énergie.

Le taux de transfert de masse et de quantité de mouvement des vagues est donnée par [10].

$$I_x = \dot{m}_x = \frac{\rho a^2 g}{2c} \quad \text{III-17}$$

Les forces exercées par les vagues sur les corps flottants ou immergés par unité de largeur est donnée par [10]

$$F = \frac{1}{4} \rho g (a_i^2 + a_r^2 - a_t^2) \left(1 + \frac{2kh}{\sinh kh}\right) \quad \text{III-18}$$

Où  $a_i$  (l'incident),  $a_r$  (réfléchi),  $a_t$  (transmis) l'amplitude des ondes.

$$F = \frac{1}{4} \rho g (a_i^2 + a_r^2 - a_t^2) \quad (\infty > h \text{ pour l'eau profonde}) \quad \text{III-19}$$

La dérivation de la force impliquée dans le flux calculé moment horizontal dans le plan vertical et le flux, en l'absence des vagues, en raison de la pression hydrostatique [10],

$$P_0 = -\rho gh \quad \text{III-20}$$

L'énergie totale est également composé d'énergie potentielle et cinétique donnée par la théorie des ondes linéaire [3],

$$E_p = E_k = \frac{\rho g H^2 \lambda b}{16} \quad (b \text{ largeur de la crête}) \quad \text{III-21}$$

L'énergie totale [13] des vagues est donnée par

$$E = E_p + E_k = \frac{\rho g H^2 \lambda b}{8} \quad \text{III-22}$$

L'énergie potentielle est due à la hauteur des vagues et de l'énergie cinétique est due au mouvement des particules d'eau. Alors que la vague progresse, il transfère l'énergie de point à point sa direction. La puissance de l'onde est donnée par [3],

$$P = \left(\frac{1}{4}\rho g a^2\right)(gc)(b) \quad \text{III-23}$$

### ***Réponse des dispositifs à vagues***

Les vagues produisent une perturbation périodique. Lorsque le système OWEC est déployé dans l'océan, les vagues exercent une force sur l'appareil. La force exercée par les vagues est de nature périodique et dépend essentiellement de la hauteur des vagues, la période et est donnée par [10],

$$F \cos wt \quad \text{III-24}$$

La force de réaction est produit par la force de rappel, la force d'amortissement (frottement), l'extraction d'énergie (PTO amortissement) et la force de radiation [10],

$$F \cos wt - D\dot{y} - Sy = m\ddot{y} \quad \text{III-26}$$

Comme on peut l'observer à partir de l'équation ci-dessus, la force d'amortissement est linéairement proportionnelle à la vitesse alors que la force de rappel est linéairement proportionnelle au déplacement.

La fréquence de la force d'amortissement naturelle due à l'extraction d'énergie est donnée par [10]

$$w_0 = \sqrt{\frac{S}{m}} \quad \text{III-27}$$

$S$  force de rappel en N et  $m$  la masse de système.

La puissance extraite peut être calculée comme [10],

$$F_i = D_e \dot{y} \quad \text{III-28}$$

$$P_i = (D_e) \dot{y}^2 \quad \text{III-29}$$

De puissance extraite, la puissance moyenne est donnée par [10],

$$P_{rm} = \frac{1}{2} D_e \dot{y}^2 = \frac{1}{2} D_e c^2 w^2 \quad \text{III-30}$$

$c$  ajouté coefficient de masse,  $D_e$  est coefficient d'amortissement.

les vagues génère des coups est donnée par [15],

$$s = \frac{H}{2} * \sin wt \quad \text{III-31}$$



Le couple est réglé de manière à obtenir la hauteur désirée de l'onde. La hauteur des vagues peut être analytiquement vérifiée à l'aide d'une onde d'élevation de la surface de la machine à piston, donnée par [15].

$$\phi = \frac{4s \tanh kh \sinh kh}{w(2kh + \sin 2kh)} \cosh k(z + h) \cos(kx - wt) \quad \text{III-32}$$

$$\eta(x, t) = -\frac{\partial \phi}{\partial t} \Big|_{z=0} = \frac{4s \sinh^2 kh}{(2kh + \sin 2kh)} \sin(kx - wt) \quad \text{III-33}$$

Où  $s$  est le couple et  $k$  le nombre d'onde.

### III.2.1.2 analyse et simulation des seules bouées CFD

La puissance instantanée capturée par la bouée dépend de la prise de force d'amortissement et de la vitesse de soulèvement de la bouée. la puissance totale des ondes est calculée en utilisant [15]

$$P = \frac{\rho g H^2 T}{16\pi} \text{ kW/m} \quad \text{III-34}$$

Les paramètres des la bouée sont représentés respectivement.

```
% ***** Constantes générales *****
g = 9,81;% accélération due à la gravité
rhoWater = 1,025;% de densité de l'eau de mer.
Cd = 0,68% coefficient de traînée de cylindre Bertiaux
A = 0,2;
D = 5;% projet sous l'eau
% Hs = 3,5;% hauteur significative des vagues Summer
% Run cette simulation pour l'hiver Hs = 2.5
Ts = 8;% pour l'hiver Ts = 8
Hs = 1,5;% hauteur significative des vagues Summer
% Run cette simulation pour l'hiver Hs = 2.5
Ts = 6;% pour l'hiver Ts = 8
% ***** Dimensions de la bouée *****
Dspar = 0; Lspar = 0; Dfloat = 0,09; Lfloat = 80; Ddamper = 15,5; Ldamper = 0,05;
```

### III.2.2 PMLG à entraînement direct utilisant FEM

Le générateur linéaire propose un mécanisme de conversion d'énergie pour un système robuste OWEC. Raison de la baisse des prix des aimants NdFeB, de nouvelles recherches dans des générateurs linéaires est possible. Aimants NdFeB produisent une haute densité de flux magnétique permettant ainsi de réduire le poids du système. Aussi linéaire quelques générateurs soulèvent le mouvement des vagues pour produire de l'électricité avec un simple mouvement de mécanisme de décollage. Cela réduit le besoin d'entretien et rend le générateur adapté aux applications de vagues océaniques [20].

### III.2.2.1 la structure PMLG

Un longeron vertical fixe est ancré sur le fond marin. Les aimants sont montés sur le longeron comme illustré à la figure III.1. Cette partie est aussi appelé un longeron actif ou d'un traducteur. L'armature est constituée de l'ensemble corecoil intérieur du flotteur active (bouée). L'armature et le traducteur sont isolées par une lame d'air. La bouée se soulève dans les vagues de l'océan, qui se déplace le induit par rapport à un traducteur stationnaire. Ce mouvement relatif provoque un changement de flux, il en générant des CEM sur les bobines d'induit. La construction au-dessus des aimants à l'intérieur et en dehors de bobines est sélectionné comme il est prévu de réduire le coût du système.

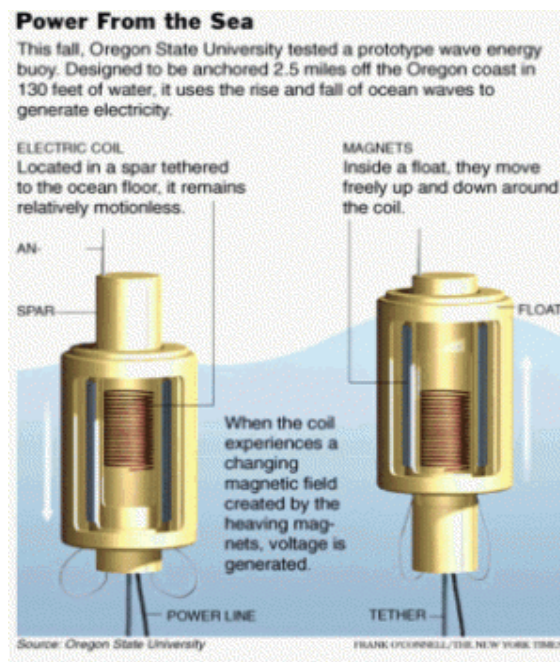


Figure III.1 l'ensemble de la bouée

### III.2.2.3 PMLG [8] [21]

Le générateur est chargé avec une charge résistive. Le circuit électrique peut être trouvée dans la figure III.2. La puissance de sortie et le courant se trouve à diminuer avec une augmentation de la résistance de charge, tandis que la tension et l'efficacité se trouve à augmenter avec la charge.

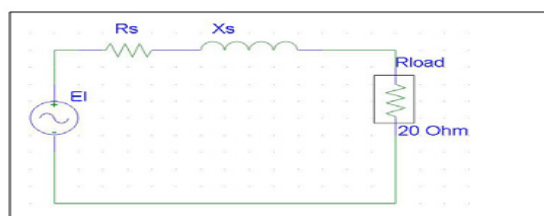
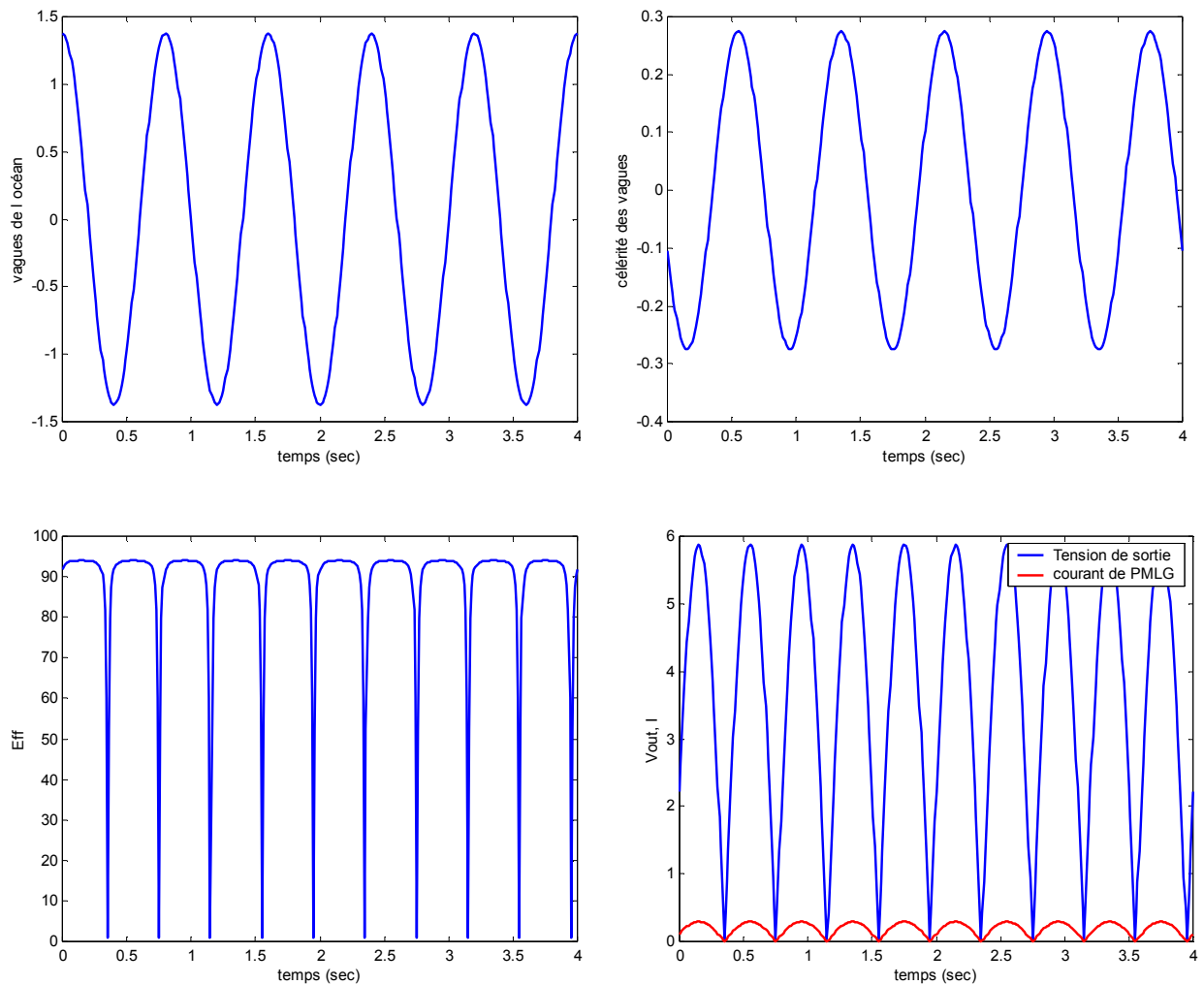


Figure III.2 Circuit électrique de PMLG

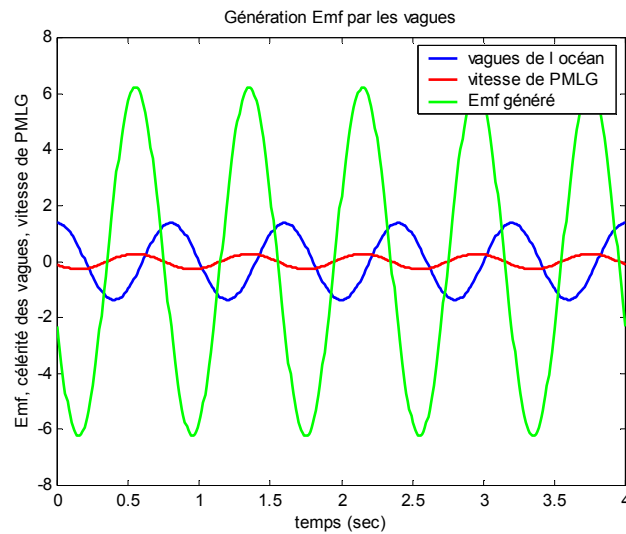
### Les paramètres de système

L'effet de divers paramètres de conception sur courant, la tension de sortie, l'efficacité et la puissance de sortie peut être étudiée.

Efficacité et EMF est jugée augmentation linéaire avec l'augmentation de la hauteur de l'aimant tandis actuelle se trouve être à la baisse. La valeur de 5 mm est choisi car il donne un rendement de 96%, 5 V, comme force contre-électromotrice, 0,22 A en tant que courant.



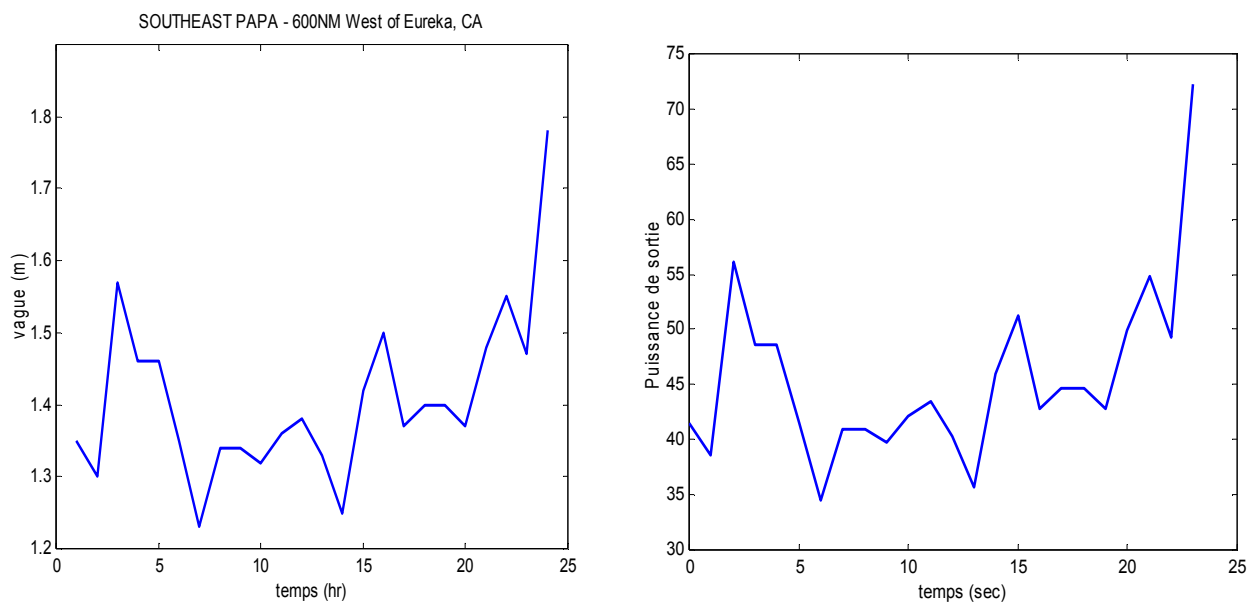
**Figure III.3** déplacement des vagues en m, vitesse [m/s], le courant, la tension, l'efficacité

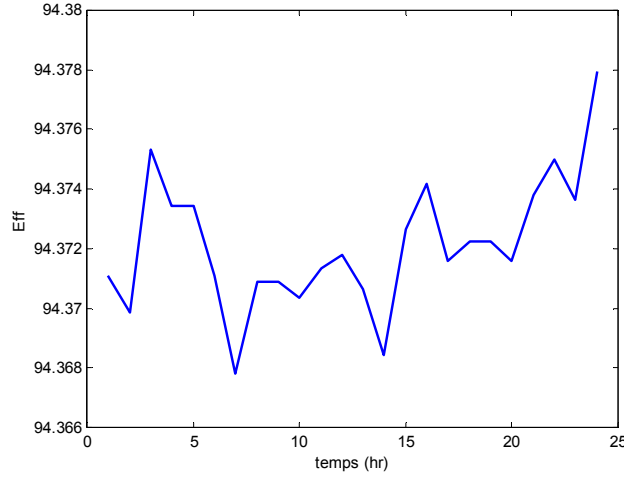


**Figure III.4** *le courant, la tension, l'efficacité*

La valeur de pression de crête calculée de FEM est un peu plus élevée que la valeur analytique. La force de denture n'est pas optimisée et constitue le cadre de l'étude future.

Nous prenons les données suivants à partir de National Data Buoy Center, Pour la journée 2013 02 01 et le lieu 40.754 N 137.464 W (40°45'16" N 137°27'51" W) ; West of Eureka,





**Figure III.5** L'énergie des vagues capturé par le système OWEC

### III.2.3 Dynamique du système de bouées

Système OWEC soulèvement des vagues se compose du système SPAR, amortisseur, amarrage et bouées (float). Virez étude de réponse de système OWEC peut être séparé de bouée et longeron. Aussi le mouvement couplé soulèvement et rouler peut être étudiée séparément. Dans les présentes bouée d'étude soulèvement réponse est étudié seul. La bouée est couplé à espar, donc il y aura certaines frictions entre la bouée et du longeron. Toutefois, la friction est négligée et l'analyse est séparée de flotteur et le longeron. Dans la section suivante fonction de transfert général est décrit.

La force requise pour déplacer la bouée dans l'eau est donné par [22],

$$F = (m + m')V$$

$$m_v = m + m'$$

$$m' = C_m \rho (Vol)$$

$$F_B = \iint p d_A \quad \text{III-35}$$

Où  $m'$  est la masse ajoutée,  $m_v$  est appelée masse virtuelle,  $C_m$  est ajouté coefficient de masse, volume est de l'eau déplacée par le corps immergé.

Pour le calcul des forces sur la bouée, on fait l'hypothèse que les dimensions des bouées sont petites par rapport à longueur d'onde soit bouée dimensions ne changent pas la forme d'onde. On fait l'hypothèse que les forces baisse sont positifs. Les différentes forces agissant sur la bouée sont donnés comme suit:

poids  $W_B = \rho g S D$  agissant vers le bas [22],

Pression a) En raison de la bouée déplacement  $x$  z

$$P_1 = -\rho g S (D + X)' \quad \text{III-36}$$

b) Due à l'élévation des vagues  $\eta_0$  [22]

$$P_2 = -\rho g S \eta_0 e^{-K D'} \quad \text{III-37}$$

En appliquant la deuxième loi de Newton de mouvement des forces et l'équilibrage [22]

$$c x + b x' + m_v x'' = F_0 \cos (w t + \sigma) \quad \text{III-38}$$

$c = \rho g S$  = rappel constante

$b$  = Coefficient d'amortissement soulèvement

$d$  = Coefficient linéaire de vague induite par drag.

Force d'excitation par les vagues est donnée par [22],

$$F_0 = A e^{-K D} [(c - m_v w^2)^2 + (d w)^2]^{1/2} \quad \text{III-39}$$

La fréquence naturelle d'oscillation est donnée par,

$$f_n = \sqrt{m_v / c} \quad \text{III-40}$$

Les forces de traînée peuvent être linéarisées [22],

$$b = \frac{4}{3\pi} w \delta C_D S X = \frac{4}{3\pi} w \delta C_D S A \quad \text{III-41}$$

En intégrant l'équation du mouvement, l'équation du mouvement de houle est donnée par

$$x = \frac{A}{m_v} \frac{[(c - m_v w^2)^2 + (b w)^2]^{1/2}}{[(p^2 - w^2)^2 + 4 n^2 w^2]^{1/2}} \cos(w t + \sigma + \theta) \quad \text{III-42}$$

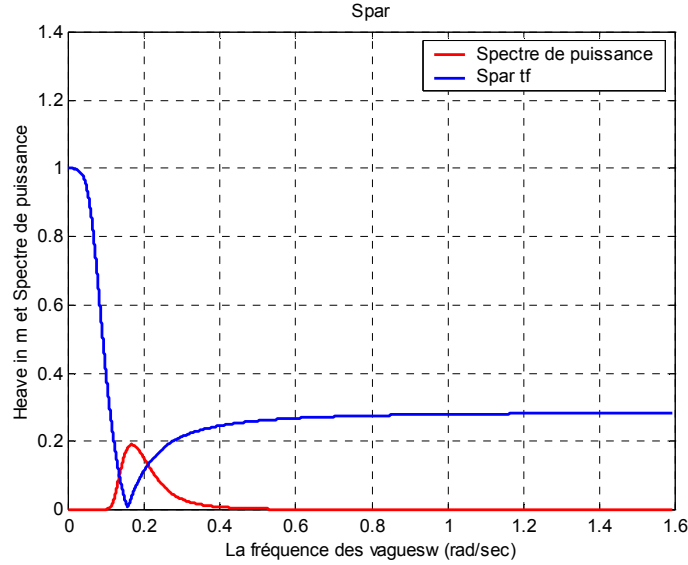
$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{-b w}{c - m_v w^2} \right) \quad \text{III-43}$$

$\theta$  est l'angle de phase entre la force et la réaction pilonnement.

### III.2.3.1 Conception de longeron

Le longeron reste stationnaire avec des vagues et ne se déplace pas librement avec des vagues contre le flotteur. Cela produit un mouvement linéaire relatif entre longeron et le flotteur qui produit de l'énergie utile. Sur la plage utile du spectre d'énergie, il peut être observé à partir de la figure. 5.1 que la bouée ne soulèvent dans la gamme de fréquences de contenu énergétique élevé. Ce comportement idéal est obtenu en amortissant fortement le longeron en augmentant

coefficient d'amortissement. De plus, les plaques d'amortissement assurer un amortissement à un poteau nu (longeron).



**Figure III.6** fonction de transfert longeron

La plupart de l'énergie se trouve dans cette gamme de fréquences, il y aura un mouvement linéaire entre longeron et le flotteur. Cela aidera à induire tension dans les bobines. Les plaques de registre aider à faire le longeron stationnaire. Si un longeron nu est déployé dans la mer, il serait instable et sauter hors de l'eau [22, 23]. Une étude plus détaillée de la conception d'amarrage est laissé comme un travail futur.

### III.2.3.2 Densité d'énergie spectrale de vague

Le spectre de Pierson-Markowitz est applicable aux états de mer entièrement développés. Ainsi, un état de la mer partiellement développé qui n'est pas trop restrictive et applicable aux sites côtes de l'Oregon est sélectionné. Un tel spectre est offert par le spectre Schneider Bret. Il est aussi appelé un spectre à deux paramètres [9, 24].

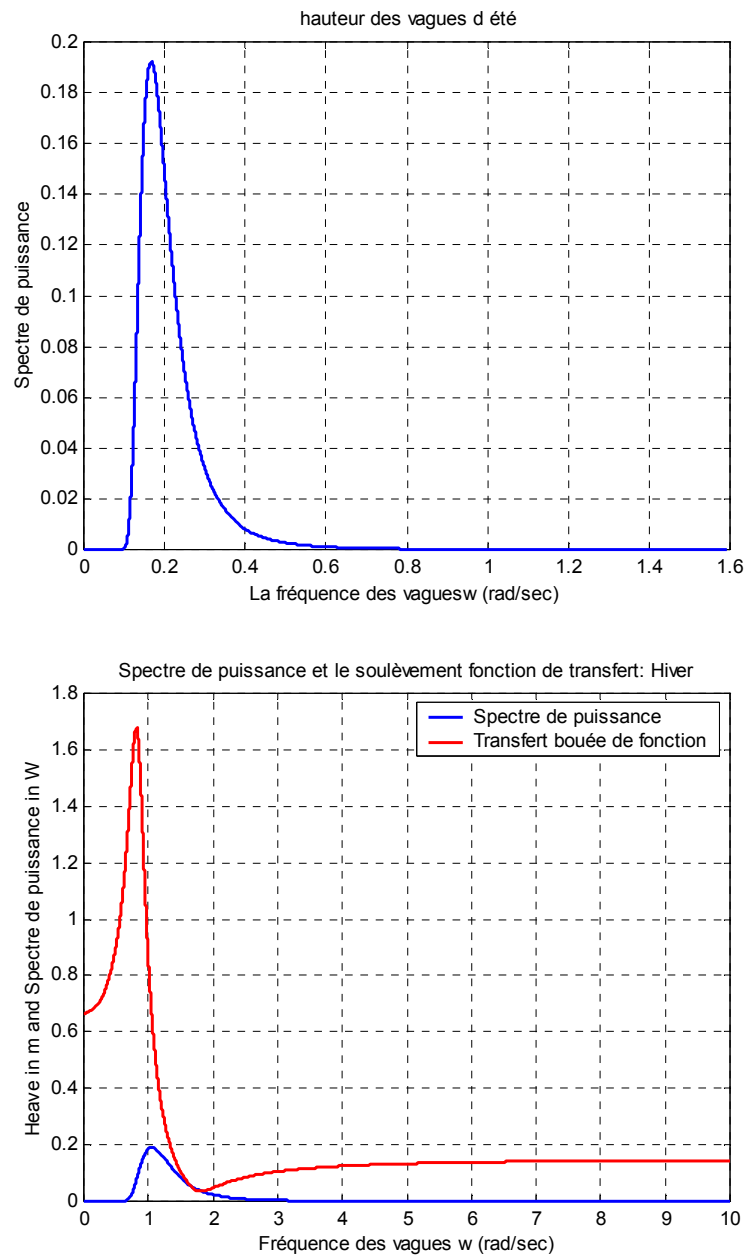
$$s(w) = 0.3125 \times \frac{Hs^2 w^4}{w^5} \times e^{-1.25(w_s/w)^4} \quad \text{III-44}$$

$$w = \frac{2\pi}{Ts} \quad \text{III-45}$$

$Hs$  = La hauteur significative des vagues (m)

$Ts$  = période significative des vagues (sec)

$$\int_{-\infty}^{\infty} s(w) \cdot d(w) = \left(\frac{Hs}{4}\right)^2 \quad \text{III-46}$$



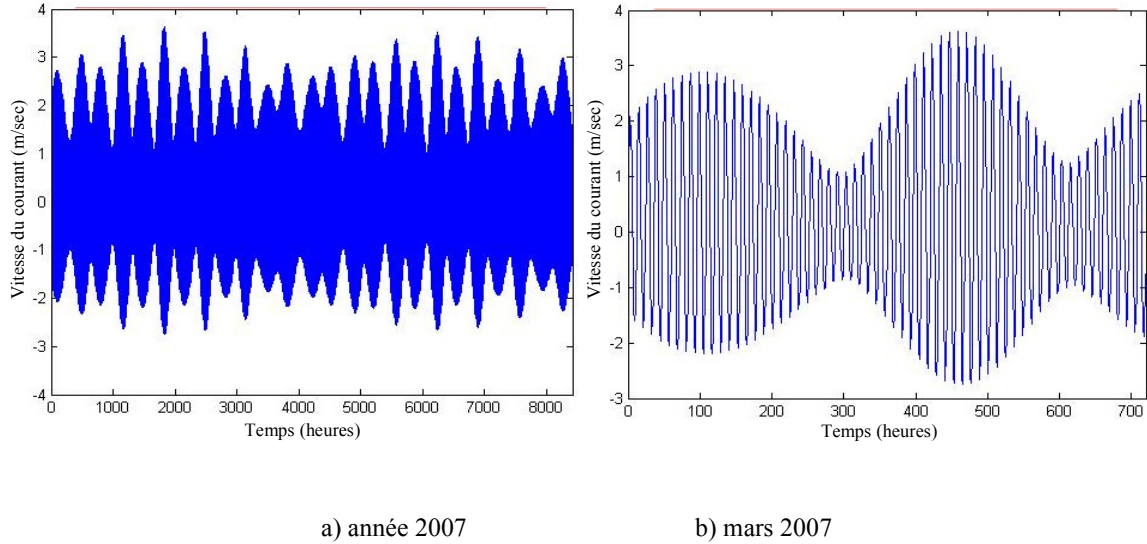
**Figure III.7** Spectre d'énergie pour l'été et l'hiver

En faisant varier la fréquence, on obtient parcelle de spectre d'énergie. La gamme de fréquence de haute teneur en énergie est à noter pour plus tard comparaison avec soulèvement réponse.



### III.2.4 Simulation réaliste

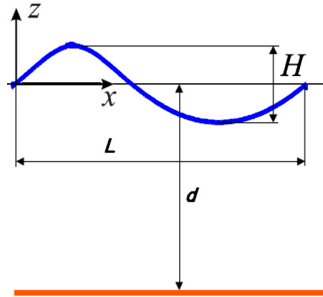
Pour illustrer cette méthodologie, nous avons calculé les vitesses des courants, dans le Raz-de-Sein, au cours de l'année 2007 et du mois de mars 2007. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 3.



**Figure III.8** Vitesses des courants de marée dans le Raz de Sein pour l'année 2007 et le mois mars 2007

Pour prendre en compte l'effet de la houle considérée comme l'élément le plus perturbateur pour la ressource. Il permet de calculer, pour une houle théorique donnée de période  $T$ , d'amplitude  $H$  et de longueur d'onde  $L$  se propageant sur un fond de profondeur  $d$  (figure 15), la vitesse induite à une profondeur donnée  $z$  selon l'expression très connue [9].

$$\begin{cases} V_{tides} = grad \phi \\ \phi = -\frac{HL}{2T} \frac{ch 2\Pi \left( \frac{z+d}{L} \right)}{sh 2\Pi \left( \frac{d}{L} \right)} \sin 2\Pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{L} \right) \end{cases}$$

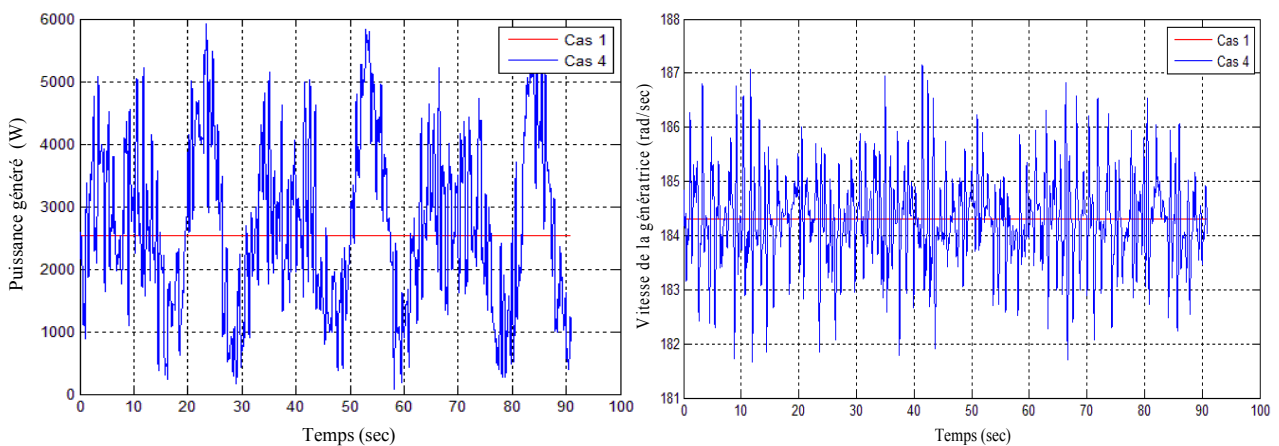


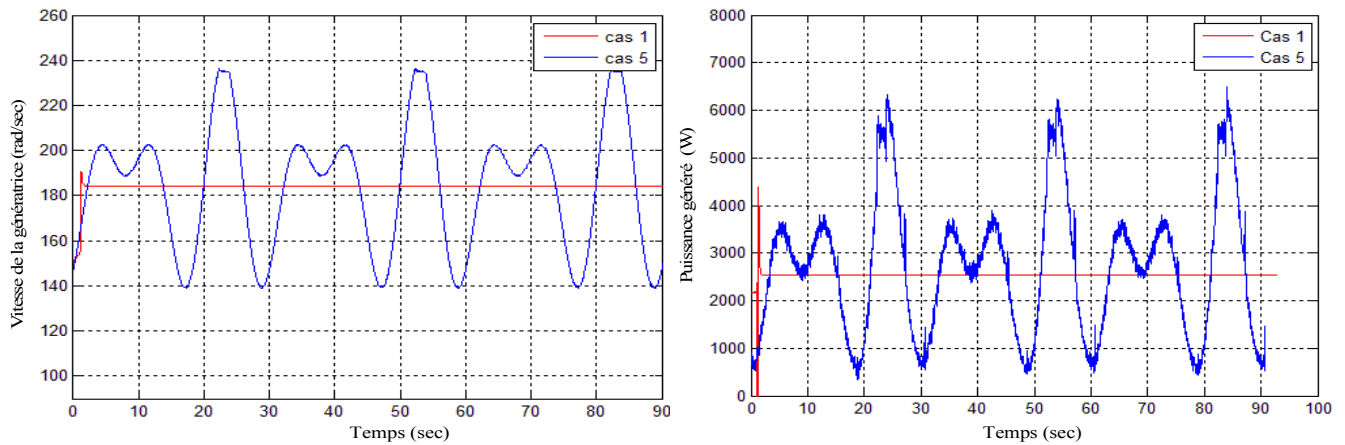
**Figure III.9** Caractéristiques de la houle

**Tableau 1. Cas simulés**

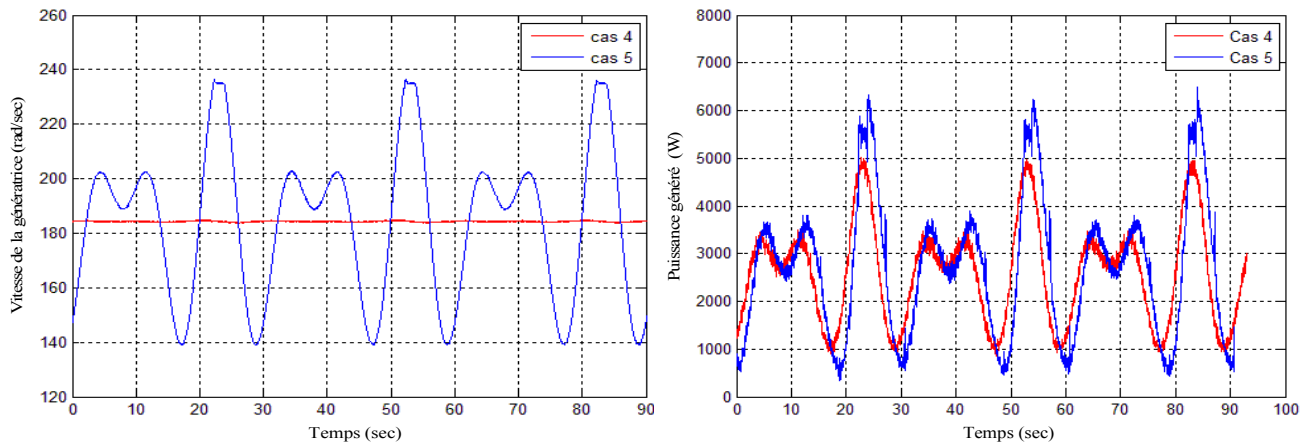
| Cases | Conditions de simulations/<br>vitesse du courant (m/sec)                                                                                 | P (kW) |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| 1     | $V_{real} = 2$ (pas de perturbation)<br>$V_{ref} = 2$                                                                                    | 2.535  |
| 2     | $V_{real} = 2 + 0.3252 \cos(0.4189t) + 0.2749 \cos(0.6283t)$<br>$V_{ref} = 2 + 0.3252 \cos(0.4189t) + 0.2749 \cos(0.6283t)$              | 2.694  |
| 3     | $V_{real} = 2 + 0.3252 \cos(0.4189t) + 0.2749 \cos(0.6283t)$<br>$V_{ref} = 2$                                                            | 2.612  |
| 4     | $V_{real} = 2 + 0.3252 \cos(0.4189t) + 0.2749 \cos(0.6283t)$<br>$+ b(t)$<br>$V_{ref} = 2$                                                | 2.691  |
| 5     | $V_{real} = 2 + 0.3252 \cos(0.4189t) + 0.2749 \cos(0.6283t)$<br>$+ b(t)$<br>$V_{real} = 2 + 0.3252 \cos(0.4189t) + 0.2749 \cos(0.6283t)$ | 2.821  |

Différents types de vitesse de courant servent de référence pour déterminer la consigne en vitesse de rotation selon que l'on considère que cette vitesse de référence est issue d'une mesure par un capteur (cas 1, 2 et 5) ou par le modèle (cas 3 et 4).

*a) cas 1 et 4*



b) cas 1 et 5



c) cas 4 et 5

**Figure III.10** Performances de la génératrice pour une ressource perturbée

La figure III.10 illustre alors la vitesse de la génératrice ainsi que la puissance qu'elle génère les différents cas du tableau 1.

### III.3- Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié le dispositif OWEC système de bouées pour capter la récupération de l'énergie des vagues (houlomotrice), qui représente ce convertisseur un générateur composé d'une base fixe et d'une bouée mobile.

Dans ce chapitre nous avons vu la formulation mathématique, la description du problème et les modèles de turbulence (OWEC : convertisseur d'énergie de vague d'océan) utilisés dans notre simulation numérique.

## **Conclusion générale**

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

Dans cette deuxième partie de la mémoire consacré à la récupération de l'énergie de la houle, nous avons dans un premier temps présenté les différents types de houlogénérateurs : les colonnes d'eau oscillantes, les rampes à déferlement, les systèmes à corps mus par la houle. Nous avons ensuite évoqué les problématiques du génie électrique liés à ces houlogénérateurs et qui en font des contextes de recherche intéressants. Et dans la dernière partie nous avons étudié le dispositif OWEC système de bouées pour capter la récupération de l'énergie des vagues (houlomotrice), qui représente ce convertisseur un générateur composé d'une base fixe et d'une bouée mobile.

Les vagues qui animent la surface des océans représentent une source d'énergie renouvelable considérable, dont la part exploitable est estimée à environ 20000TWh par l'agence internationale de l'énergie. De part le monde, de nombreux systèmes destinés à la récupérer sont en cours de développement.

D'autres types de houlomotrices sont en cours de développement. Plusieurs modules peuvent être regroupés pour constituer des parcs ou «fermes» houlomotrices offshore. On préfère néanmoins limiter leur distance à la côte pour des questions de coût de la liaison électrique par câble sous-marin et des ancrages, ce qui situe la profondeur d'eau typique à 40 m pour ces houlomotrices. Leur maintenance est possible après remorquage des modules en zone abritée. Leurs impacts visuels et environnementaux et les conflits d'usage de l'espace maritime sont en cours d'évaluation sur les installations déjà opérationnelles.

## **Bibliographie**

- [1]. Ruellan Marie (2007), *Méthodologie de dimensionnement d'un système de récupération de l'énergie des vagues*, Ecole normale supérieure de Cachan, Thèse de doctorat soutenue le 11 dec 2007.
- [2]. A. Babarit (2005), *Optimisation hydrodynamique et contrôle optimal d'un récupérateur d'énergie des vagues* ; Thèse de doctorat; Ecole Centrale de Nantes.
- [3]. BYDLOWSKI P., *Etude du lissage de la production d'électricité de houlogénérateurs directs, seuls ou en parc*, Rapport de stage de master 2 recherche, Université de Nantes, 2010.
- [4]. SAULNIER J., *Climatologie fine des systèmes de vagues pour l'étude des systèmes houlomoteurs*, Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 2009.
- [5]. Judicaël Aubry, *Optimisation du dimensionnement d'une chaîne de conversion électrique directe incluant un système de lissage de production par supercondensateurs. Application au houlogénérateur SEAREV*, Thèse de Doctorat, Ecole normale supérieure de Cachan, Novembre 2011.
- [6]. Charles Monroy, *Simulation numérique de l'interaction houle-structure en fluide visqueux par décomposition fonctionnelle*, Thèse de DOCTORAT, Ecole Centrale de Nantes, novembre 2010.
- [7]. P. Roux de Reilhac, *Génération de houle multidirectionnelle en bassin d'essais, influence de la directionnalité de la houle sur les mouvements d'un navire*, Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 2008.
- [8]. Marie RUELLAN, *Méthodologie de dimensionnement d'un système de récupération de l'énergie des vagues*, Thèse de Doctorat, École Normale Supérieure de Cachan, Décembre 2007.
- [9]. Ruellan, *Pré-dimensionnement d'un houle-générateur pendulaire*, REE, pp.87–97, Juin/juillet 2006.
- [10]. Shaw R, *Wave Energy A design challenge*, Ellis Horwood Publishers
- [11]. Lighthill J, *Waves in fluids*, Cambridge university press, 1978
- [12]. Currie, I.G, *Fundamental mechanics of fluids*, Mc-Graw-Hill, 1993.
- [13]. M.E. McCormick, *Ocean Engineering Wave Mechanics*, Wiley, 1973.
- [14]. E.B. Agamloh, A.K. Wallace, A. von Jouanne, *A novel wave energy extraction device with contact less force transmission system*, 44<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting, Reno, Nevada, Jan 2006.
- [15]. R. G. Dean and R.A. Dalrymple, *Water Wave mechanics for Engineers and Scientists*, Englewood Cliffs: Prentice-Hall, Inc., ISBN 0-13-946038-1, 1984.
- [16]. Rotterdam: A. A , *Physical modeling in Coastal Engineering*, Balkema, Inc., ISBN 90-6191-516-3, 1985.
- [17]. [17] J.Falnes, *Ocean Waves and oscillating systems*, Cambridge University Press, 2002.
- [18]. P.V.Shotri, *Fluid mechanics*, Nirali Prakashan, India, 2004.
- [19]. [http://www.chc.nrc.ca/English/Lab%20Tech/LabTech\\_AWA\\_e.html](http://www.chc.nrc.ca/English/Lab%20Tech/LabTech_AWA_e.html)

---

### *Bibliographie*

---

- [20]. Oskar Danielson, et.al. *Permanent magnet fixation concepts for linear generator*. University of Uppsala, Sweden.
- [21]. Hamzah Arof, A. Eid et.al 2004. *Permanent magnet linear generator design using Finite Element Modeling*. IEEE 2004, 0-7803-8575-6/04
- [22]. Henri O. Berteaux., *Coastal and Oceanic buoy engineering*, Gulf Publishing Corporation
- [23]. H.O Berteaux., *Buoy Engineering* A Wiley-inter science publication.
- [24]. M. E. McCormick, *Ocean wave energy conversion concepts*, IEEE OCEANS, vol. 11, pp. 553-558, 1979.

### **Webographie**

- <http://www.dictionnaire-environnement.com/energiehoulomotriceID1444.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-developpementdurable/8457/article.html>
- <http://www.zurbains.com/article-894.html>
- [www.wave-energy.net](http://www.wave-energy.net)
- <http://www.meteolafleche.com/houle.html>
- <http://veleurope.free.fr/wavepower.pdf>
- [http://en.wikipedia.org/wiki/Wave\\_Dragon](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://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/events/ocean\\_energy/1200awsmkiiien.pdf](http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/events/ocean_energy/1200awsmkiiien.pdf)
- <http://polizeros.com/2007/04/27/wave-power-archimedes-wave-swing/>