



HAL
open science

La récupération de l'énergie de la houle, partie 1 : caractérisation de la ressource et bases de l'hydrodynamique

Aurélien Babarit, Jean-Marc Rousset, Hakim Mouslim, Judicael Aubry,
Hamid Ben Ahmed, Bernard Multon

► To cite this version:

Aurélien Babarit, Jean-Marc Rousset, Hakim Mouslim, Judicael Aubry, Hamid Ben Ahmed, et al.. La récupération de l'énergie de la houle, partie 1 : caractérisation de la ressource et bases de l'hydrodynamique. La Revue 3E.I, 2009, pp.17-25. hal-00676184

HAL Id: hal-00676184

<https://hal.science/hal-00676184>

Submitted on 5 Mar 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

La récupération de l'énergie de la houle, Partie 1 : Caractérisation de la ressource et bases de l'hydrodynamique.

**Aurélien BABARIT², Jean-Marc ROUSSET², Hakim MOUSLIM², Judicaël AUBRY¹, Hamid BEN AHMED¹
et Bernard MULTON¹**

1. Laboratoire SATIE CNRS, ENS de Cachan, Site de Bretagne
Campus de Ker Lann, 35170 BRUZ
nom@bretagne.ens-cachan.fr

2. Laboratoire de Mécanique des Fluides CNRS, Ecole Centrale de Nantes
1 rue de la Noë, 44 321 Nantes Cédex 3
aurelien.babarit@ec-nantes.fr

Résumé : *Cet article 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.*

Introduction

Les perspectives d'exploitation des énergies marines, dans le panel des énergies renouvelables, ne cessent de prendre de l'importance, notamment dans les pays disposant d'une exposition favorable mais également tenant compte du fait que les populations continentales ont une tendance naturelle à migrer vers les zones côtières. Au point de vue politique de la France, les engagements pris lors du Grenelle de la mer, en juillet 2009, en sont la preuve. «Soutenir et planifier le développement durable des énergies marines», «Engager une politique industrielle volontariste pour les énergies marines», «Agir en priorité en Outre-mer pour développer et produire de l'énergie renouvelable», ce sont les trois engagements pris par le gouvernement à propos des énergies marines. Cette prise de position politique était nécessaire car les énergies marines ont besoin, pour leur développement, d'un cadre législatif clair mais aussi d'un soutien aussi bien industriel que financier.

Sous le vocable Énergies Marines Renouvelables, on a pris l'habitude de regrouper à la fois l'énergie marémotrice et des courants marins, l'éolien offshore, l'énergie thermique des mers, celles des gradients de salinités, et également l'énergie des vagues à laquelle on s'intéresse plus en détail ici [Multon (Partie 2)]. Depuis une trentaine d'années, nombre de systèmes houlogénérateurs (systèmes de récupération de l'énergie des vagues) ont été proposés et étudiés, de par le monde mais principalement en Europe. On distingue plusieurs types de houlogénérateurs : les colonnes

d'eau oscillantes, les rampes à déferlement et les systèmes à corps mus par la houle. Ainsi, les plus récents (Pelamis, AWS, CETO, SEAREV, Wavebob...) font partie de ces systèmes actionnés directement par les vagues. Ils sont également, pour la plupart «offshore», c'est-à-dire situés loin de la côte, là où la ressource énergie des vagues est meilleure et où l'impact visuel est réduit.

Nous présentons dans cette première partie, la caractérisation énergétique et physique de la ressource houlogotrice ainsi que les outils de bases de l'hydrodynamique permettant de traiter le problème de l'interaction fluide-structure de ces systèmes de récupération de l'énergie des vagues.

1 Caractérisation de la ressource houlogotrice.

1.1 Origine de la houle

La houle est générée par l'effet du vent sur la surface des océans. Plus il souffle fort, longtemps et sur une grande distance, et plus la hauteur des vagues générées va être importante. Ces vagues, ondes de gravité, ont la particularité de se propager sans dissipation d'énergie et peuvent donc voyager sur de longues distances avant d'être dissipées sur les côtes. La houle est donc un concentré d'énergie éolienne, certains journalistes l'ont surnommée « houille bleue ».

1.2 Physique d'une vague

Du point de vue de la mécanique des fluides, la physique de l'écoulement associé à la houle est incompressible et irrotationnel, i.e :

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \vec{V} &= 0 \\ \operatorname{rot} \vec{V} &= \vec{0} \end{aligned}$$

Où \vec{V} est la vitesse du fluide.

La divergence du champ de vitesses peut être vue dans le contexte de la mécanique des fluides, comme le taux relatif de variation de volume de la particule de fluide considéré (Note : une particule fluide est un ensemble fermé, de masse constante, et de taille mésoscopique, c'est-à-dire contenant un grand nombre de molécules d'eau, mais assez petit pour considérer des grandeurs comme constantes, par exemple la température, la masse volumique ou la pression). Considérer un fluide comme incompressible se traduit donc par une divergence nulle de son champ de vitesse.

La notion de rotationnel de la vitesse décrit en mécanique des fluides une rotation de la particule fluide. Dans un écoulement irrotationnel, le rotationnel de vitesse est nul en tout point, et on peut écrire à l'aide du théorème de Stokes que la vitesse dérive d'un potentiel Φ :

$$\vec{V} = \operatorname{grad} \phi$$

En combinant cette dernière équation avec celle traduisant l'incompressibilité, on montre que ce potentiel est gouverné dans tout le domaine fluide par l'équation de Laplace :

$$\Delta \phi(M, t) = 0 \quad \forall M \in \Omega$$

On retrouve un tel formalisme en magnéto-statique avec le potentiel magnétique scalaire.

Comme nous l'avons évoqué, c'est le vent, soufflant à l'interface air-mer, qui déforme celle-ci. Cette déformation induit alors un écoulement en volume qui tend à faire revenir cette interface à l'équilibre (interface horizontale). C'est la gravité qui engendre ce retour à l'équilibre et c'est pourquoi la houle est qualifiée d'onde de gravité.

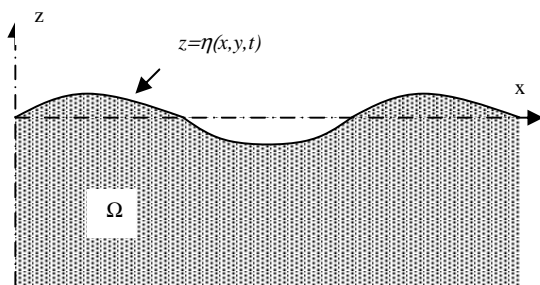


Figure 1 : Définition du domaine fluide

Pour calculer cet écoulement, il convient, à l'instar de la magnéto-statique, d'écrire des conditions aux limites du domaine fluide, les plus intéressantes s'écrivant sur la surface libre, dont la position est définie par :

$$z = \eta(x, y, t)$$

Ces conditions aux limites sont :

$$\begin{cases} \frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial \phi}{\partial y} \frac{\partial \eta}{\partial y} \\ \eta = -\frac{1}{g} \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left| \operatorname{grad} \phi \right|^2 \right) \end{cases} \quad z = \eta(x, y, t)$$

La première est la condition cinématique de surface libre, qui traduit le fait que la surface libre est une frontière physique, la seconde est la condition dynamique de surface libre, qui traduit la continuité de pression à la traversée l'interface (les effets de tension superficielle étant négligés à l'échelle de la houle).

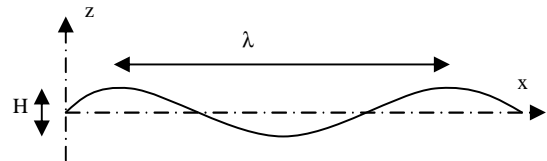


Figure 2 : définition de la longueur d'onde et de la hauteur (crête à creux) de vagues.

Comme on peut le voir, les deux conditions sur la surface libre sont non linéaires et il est donc difficile d'aller beaucoup plus loin analytiquement avec ces formulations. Cependant, la hauteur des vagues H étant en général petite devant leur longueur d'onde λ , on peut procéder au développement en série de perturbations $\varepsilon = H/\lambda$ des quantités liées à l'écoulement :

$$\begin{cases} \eta = \varepsilon \eta_1 + \varepsilon^2 \eta_2 + \dots + \varepsilon^{n-1} \eta_{n-1} + O(\varepsilon^n) \\ \phi = \varepsilon \phi_1 + \varepsilon^2 \phi_2 + \dots + \varepsilon^{n-1} \phi_{n-1} + O(\varepsilon^n) \end{cases}$$

Ce développement s'appelle le développement de Stokes. On appelle la houle associée à l'ordre de troncature n Houle de Stokes d'ordre n . Dans le cas où l'on néglige les effets d'ordre supérieur à 1, les conditions aux limites se linéarisent, ce qui permet de trouver une solution analytique au problème en utilisant la méthode de séparation des variables.

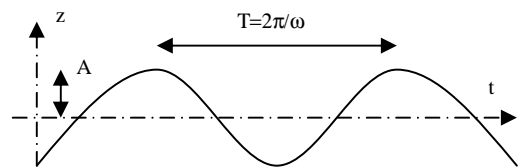


Figure 3 : Définition de la période (temporelle) et de l'amplitude de la houle régulière.

Considérons ainsi le cas particulier d'une houle régulière de pulsation ω , d'amplitude A (la moitié de la hauteur crête à creux H) et se propageant dans la direction des x positifs dans un milieu de profondeur infinie (houle de Stokes de 1^{er} ordre aussi appelé houle d'Airy). On peut montrer que son potentiel s'écrit :

$$\phi(x, y, z, t) = \text{Im}\left(A \frac{ig}{\omega} e^{k(z-ix)} e^{i\omega t}\right)$$

avec :

- g l'accélération de la gravité.
- k le nombre d'onde, défini par $k=2\pi/\lambda$, où λ est la longueur d'onde de la houle (typ 100m).

Notons que les conditions de surface libre imposent une relation entre le nombre d'onde k et la pulsation ω qui s'appelle relation de dispersion :

$$kg = \omega^2$$

1.3 Puissance linéique d'une vague

En tout point du domaine fluide, la pression peut être calculée en utilisant la relation de Bernoulli :

$$\frac{p}{\rho} = -gz - \frac{\partial\phi}{\partial t}$$

Et on rappelle que la vitesse du fluide s'obtient en dérivant le potentiel :

$$\vec{V} = \text{grad } \phi$$

Considérons à présent une surface élémentaire dS perpendiculaire à la direction de propagation ($x>0$). Le flux d'énergie à travers cette surface s'écrit :

$$f = p\vec{V} \cdot d\vec{S}$$

$$f = -\rho g z \vec{V} \cdot d\vec{S} - \rho \frac{\partial\phi}{\partial t} \frac{\partial\phi}{\partial x} dS$$

Considérons à présent la moyenne temporelle de ce flux sur une période de houle. On montre facilement que la contribution de la pression hydrostatique $-\rho g z$ est nulle et il ne reste que la contribution de la pression dynamique. Tout calcul fait, on obtient :

$$F = -\frac{1}{T} \int_0^T \rho \frac{\partial\phi}{\partial t} \frac{\partial\phi}{\partial x} dt$$

$$F = \frac{1}{2} \rho A^2 g \omega e^{2kz}$$

Intégrons à présent ce flux à travers une surface délimitée verticalement par le fond de l'océan et la surface libre, et de largeur 1 m. En s'aidant là encore de la relation de dispersion, on obtient la puissance moyenne transportée par mètre de largeur de vagues :

$$P = \frac{1}{8\pi} \rho g^2 A^2 T \quad (W.m^{-1})$$

$$P \approx H^2 T \quad (kW.m^{-1})$$

On exprime usuellement cette quantité en kW/m de front d'onde. Il est intéressant de constater que l'énergie transportée par les vagues est proportionnelle au carré de l'amplitude, mais est également proportionnel à la période des vagues. Ainsi, paradoxalement pour un électricien habitué à des puissances proportionnelles à la fréquence, plus le mouvement de la houle est lent, et plus l'énergie transportée est importante. Les mouvements rapides

étant d'habitude les plus énergétiques, ceci est suffisamment inhabituel pour être remarqué.

1.4 Aspect fréquentiel : houle réelle

La houle d'Airy est une solution régulière (i.e. monochromatique et monodirectionnelle) du problème de la propagation de la houle à la surface des océans. En pratique, la houle est irrégulière, c'est-à-dire qu'elle est à la fois multidirectionnelle et multi fréquentielle, et les enregistrements temporels en provenance de mesures en mer peuvent laisser à penser que l'on a affaire à un phénomène parfaitement aléatoire.

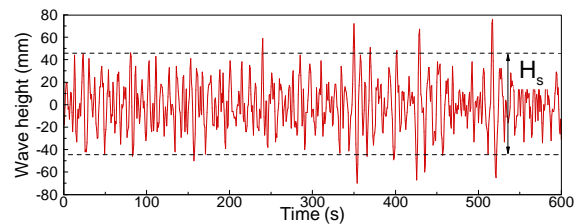


Figure 4 : Enregistrement temporel de houle mesuré en mer.

Heureusement, lorsqu'on s'intéresse au contenu spectral de la houle irrégulière, on s'aperçoit qu'il est relativement stationnaire sur des durées de l'ordre de l'heure, et qu'il présente, que ce soit pour un léger clapot ou une mer de tempête, une forme caractéristique. Cette forme peut être approchée par une fonction mathématique, dépendante de quelques paramètres statistiques, et que l'on appelle spectre de houle.

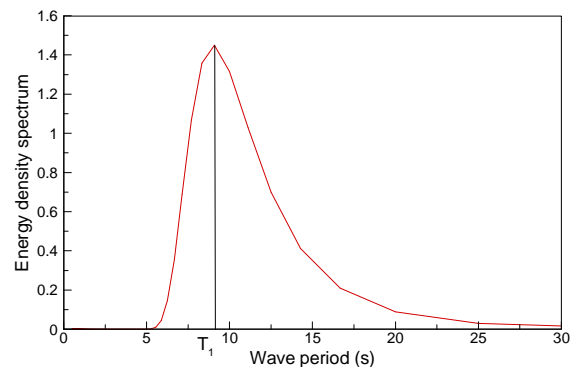


Figure 5 : Exemple de spectre de houle (spectre de Pierson-Moskowitz).

L'un des plus utilisés est le spectre de Pierson-Moskowitz :

$$S(f) = \frac{5}{16} \frac{H_s^2}{T_1^5 f^5} e^{-\frac{5}{4} T_1^4 f^4}$$

Il est caractérisé par deux grandeurs :

- La période de pic du spectre T_1 , pour laquelle le spectre est maximum.

- La hauteur significative H_s . A cette dernière grandeur correspond une définition statistique exacte, mais il est plus simple de retenir qu'elle correspond également assez bien avec la hauteur ressentie par les gens de mer.

En considérant la houle irrégulière comme une superposition de houles régulières dont les amplitudes élémentaires sont données par le spectre, on peut à nouveau calculer la puissance transportée par les vagues. On peut constater que la « chute » de puissance linéique par rapport à une houle régulière est de 60%.

$$P = 0.4H_s^2 T_1 \text{ kW/m}$$

Le tableau suivant donne quelques exemples de cette puissance transportée pour des valeurs typiques de H_s et T_1 . On peut voir que le niveau d'énergie transportée par les vagues est très variable en fonction de l'état de la mer, et peut atteindre des niveaux de puissance considérable dans les cas de fortes tempêtes.

Echelle de Beaufort	4	5	6	8
H_s (m)	1	2	3	5.5
T_1 (s)	6	8	10	14
P (kW/m)	2.4	12.8	36	170

1.5 Répartition géographique

A partir de mesures en mer, où à l'aide de modèles océano-météorologiques, on peut déterminer les états de mer qui existent en un site donné et leur densité de probabilité. En sommant les produits de cette densité de probabilité avec la puissance transportée dans l'état de mer correspondant, on peut calculer la puissance moyenne disponible en différents endroits.

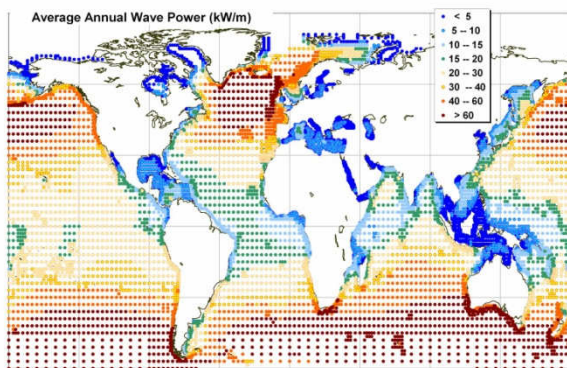


Figure 6 : Carte mondiale de la ressource énergie des vagues (Source : Douglas Westwood).

Sur la figure (6) sont ainsi portées les moyennes annuelles du flux d'énergie des vagues à l'échelle de la planète. On peut voir, avec des niveaux de ressource de

l'ordre de 40 kW/m, que les zones les mieux exposées sont :

- Dans l'hémisphère nord, la côte ouest des Etats-Unis et du Canada, la façade atlantique européenne ainsi que les îles d'Hawaii.
- Dans l'hémisphère sud, la côté chilienne, sud africaine, australienne et néo zélandaise. Les îles du Pacifique présentent également des niveaux de ressource très intéressants.

D'après l'Agence Internationale de l'Energie, la ressource exploitable 'Energie des vagues' à l'échelle mondiale représenterait environ 20 000 TWh par an, soit un sixième de la consommation mondiale d'énergie primaire.

2 Méthodes d'évaluation de l'hydrodynamique des systèmes de récupération de l'énergie des vagues.

Lorsqu'il s'agit d'évaluer les performances d'un système de récupération de l'énergie des vagues, il est nécessaire de prendre en compte les effets d'interaction des vagues avec la structure. Il s'agit là d'un problème très complexe pour lequel il n'est pas possible d'obtenir de réponse analytiquement, à part dans des cas très simples et sous un grand nombre d'hypothèses. Historiquement, la seule possibilité d'obtenir des réponses a donc été d'avoir recours à l'expérimentation sur des maquettes à échelle réduite en bassin d'essai. Ces bassins sont essentiellement de grandes piscines, équipés d'un côté de volets mobiles pour générer de la houle, et de l'autre côté d'une plage artificielle, afin de dissiper la houle et d'éviter les réflexions.



Figure 7 : Le bassin de génie océanique de l'Ecole Centrale de Nantes.

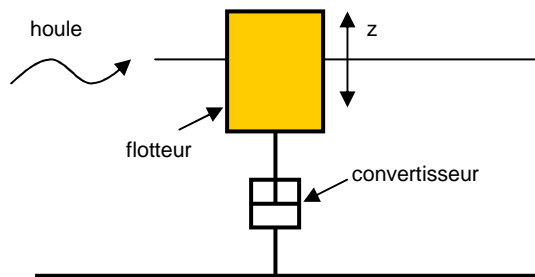
Avec l'essor de la puissance de calcul informatique, on a assisté depuis une vingtaine d'années à l'apparition de bassins virtuels, pendant numérique des bassins physiques. Ce ne sont ni plus moins que des outils de simulation numérique en hydrodynamique et il en existe à présent un grand nombre. Ils se différencient les uns des autres par les hypothèses sur lesquels ils sont bâtis, la précision de leurs résultats et leur rapidité d'exécution.

Dans la suite de cet article, on présente dans un premier temps les méthodes numériques utilisées usuellement pour traiter le problème de l'interaction fluide-structure de système de récupérations de l'énergie des vagues, puis les méthodes expérimentales utilisées notamment pour valider les prévisions de ces modèles numériques.

2.1 Méthodes numériques.

Dans le cas de la récupération de l'énergie des vagues, on utilise essentiellement des outils basés sur une théorie potentielle linéarisée, principalement pour des raisons de rapidité et de précision dans la représentation de la houle. On peut noter que ce type de méthodes est utilisé également de manière très courante dans l'industrie offshore.

2.1.1 Présentation du problème



Considérons le cas d'un système de récupération de l'énergie des vagues très simple, composé d'un cylindre vertical flottant. On suppose tous ses degrés de liberté bloqués, sauf le pilonnement (mouvement de translation vertical z). On suppose également que ce système est relié au fond la mer par un convertisseur d'énergie (par exemple un vérin hydraulique), qui amortit le mouvement de la bouée en le transformant en une autre forme d'énergie (huile sous pression dans le cas du vérin ou électrique dans le cas d'un générateur linéaire).

2.1.2 Bilan des forces

En appliquant le principe fondamental de la dynamique à ce système, on peut écrire :

$$m\ddot{z} = f_{FS} + f_{gravité} + f_{Convertisseur}$$

Où :

- $f_{Convertisseur}$ représente la force exercée par le convertisseur sur le flotteur.
- $f_{gravité}$ est la force due à la pesanteur, égal à $-mg$.
- f_{FS} représente la force associée à l'interaction fluide structure. Elle correspond simplement à

l'intégration de la pression p sur la surface mouillée S du flotteur.

En faisant les mêmes hypothèses que pour la description de la houle, on se place à nouveau dans le cadre d'un écoulement dérivant d'un potentiel Φ . En utilisant la relation de Bernoulli pour exprimer la pression, on peut montrer :

$$f_{FS} = \int_S p \vec{n} \cdot \vec{z} dS$$

$$f_{FS} = -\rho g \int_S z \vec{n} \cdot \vec{z} dS - \rho \int_S \frac{\partial \Phi}{\partial t} \vec{n} \cdot \vec{z} dS$$

où \vec{n} est un vecteur normal à la surface du flotteur.

Dans cette dernière équation, le premier terme est simplement l'intégration de la pression hydrostatique que la surface du flotteur. Il correspond à l'**effort hydrostatique**, mieux connu sous le nom de Poussée d'Archimède. Le second est la partie dynamique de la pression, c'est l'**effort hydrodynamique**.

2.1.3 Effort hydrostatique

Supposons à présent que l'amplitude du mouvement est petite par rapport aux dimensions du corps. On peut alors montrer que la somme de l'effort hydrostatique et de l'effort de gravité se réduit à un effort de raideur :

$$-mg - \rho g \int_S z \vec{n} \cdot \vec{z} dS = -Kz$$

Ainsi, la somme des efforts dus à la poussée d'Archimède et à la gravité est équivalente à un ressort de coefficient K .

Soit A la surface associée à l'intersection du plan $z=0$ avec le volume défini par la surface du flotteur. Le coefficient de raideur K est donné par :

$$K = \rho g A$$

2.1.4 Efforts hydrodynamiques

Usuellement, on représente le potentiel de l'écoulement comme la superposition de trois composantes :

$$\phi = \phi_I + \phi_D + \phi_R$$

Cette décomposition s'appelle la décomposition de Haskind. Chacun des termes correspond à un phénomène particulier :

- Le premier terme ϕ_I correspond au potentiel de la houle incidente, se propageant en l'absence de corps (cf paragraphe 1). Les efforts de pression hydrodynamique associés à ce terme sont les **efforts de Froude-Krylov**.
- Le second terme ϕ_D est appelé potentiel de houle diffractée. Il correspond au champ de houle qui serait réfléchi par le flotteur si celui

était fixe (on peut penser au champ renvoyé par une digue). Les efforts de pression hydrodynamique associés à ce terme sont les **efforts de diffraction**.

- Le troisième terme Φ_R est appelé potentiel de radiation. Il correspond au champ de houle qui est émis par le flotteur lorsque celui-ci bouge en eau calme (on peut penser au champ de vagues créé par un caillou jeté dans un lac). Les efforts de pression hydrodynamique associés à ce terme sont les **efforts de radiation**.

2.1.4.1 Effort d'excitation et de diffraction

On appelle efforts d'excitation les efforts dus aux termes de houle incidente et de diffraction :

$$f_{ex} = -\rho \int_S \frac{\partial(\Phi_I + \Phi_D)}{\partial t} \vec{n} \cdot \vec{z} dS$$

2.1.4.2 Effort de radiation

En ce qui concerne les efforts de radiation, on peut montrer, dans le domaine fréquentiel, que :

$$f_{rad} = -\rho \int_S \frac{\partial \Phi_R}{\partial t} \vec{n} \cdot \vec{z} dS$$

$$f_{rad} = -CM(\omega)\ddot{z} - CA(\omega)\dot{z}$$

En d'autres termes, les efforts de radiation sont la somme de deux parties, l'une proportionnelle à l'accélération et l'autre à la vitesse du flotteur. Le coefficient associé à l'accélération à la dimension d'une masse, on l'appelle **masse d'eau ajoutée**. Le terme proportionnel à la vitesse est le **coefficient d'amortissement de vagues**. Il correspond au transfert d'énergie mécanique du flotteur dans le champ de vagues rayonné.

2.1.5 Équation du mouvement dans le domaine fréquentiel

Finalement, l'équation du mouvement d'un flotteur dans la houle s'écrit, dans le domaine fréquentiel :

$$(m + CM(\omega))\ddot{z} + (CA(\omega) + B)\dot{z} + \rho g A z = f_{ex}(\omega)$$

Où le terme $B\dot{z}$ représente l'effort du convertisseur d'énergie (dans le cas d'un effort de type visqueux). On constate que cette équation est similaire à celle d'un oscillateur mécanique simple (système masse – ressort par exemple), mais dont les coefficients varieraient avec la fréquence.

En pratique, les coefficients CM , CA et f_{ex} sont calculés à l'aide de logiciels dédiés (WAMIT, Aquaplan par exemple) et basés sur des méthodes aux éléments frontières. Une fois ce calcul fait, la vitesse du flotteur s'obtient très simplement par :

$$\dot{z} = \frac{f_{ex}}{(CA + B) + i[(m + CM)\omega - K/\omega]}$$

Et la puissance moyenne produite par ce récupérateur de l'énergie des vagues pour une houle de pulsation ω est :

$$P = \frac{1}{2} B |\dot{z}|^2$$

La figure 8 présente la fonction de transfert et la puissance moyenne produite ainsi obtenues pour le cas d'un flotteur cylindrique de 10 m de diamètre et 10 m de tirant d'eau (hauteur moyenne mouillée du flotteur).

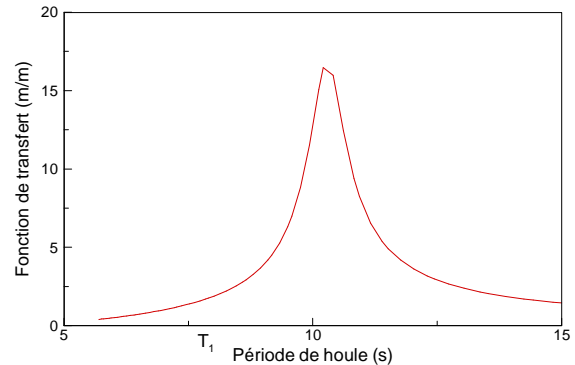


Figure 8 : Fonction de transfert d'un flotteur cylindrique, en mètre de réponse par mètre d'amplitude de houle incidente.

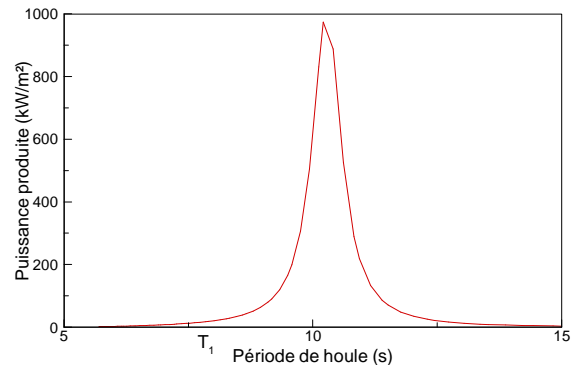


Figure 9 : Puissance absorbée par le système de récupération de l'énergie des vagues, en kW par mètre d'amplitude de vagues au carré.

Comme on pouvait s'y attendre vu l'allure de l'équation du mouvement de ce système de récupération de l'énergie des vagues, on observe une résonance dans la fonction de transfert. Cette période de résonance correspond également au maximum de production d'énergie qui atteindrait, d'après le modèle, presque 1MW dans le cas d'une houle régulière d'amplitude 1m.

Ces résultats sont des résultats théoriques, issus de modèles numériques basés sur des hypothèses qui peuvent être mis en défaut dans la pratique. C'est pourquoi on est amené à effectuer des essais en bassin, afin de vérifier la validité de ces modèles.

2.2 Méthodes expérimentales

2.2.1 Bassins de houle

L'objectif principal pour mettre en œuvre des essais bassin sur un dispositif de récupération de l'énergie des vagues est l'étude du comportement de la machine et l'estimation de ses performances à l'aide d'un modèle réduit placé dans des conditions environnementales simulées et contrôlées. Il s'agit ainsi de reproduire au mieux et de façon réaliste le dispositif récupérateur d'énergie, de mesurer des grandeurs physiques permettant de décrire le système puis de comparer ces données aux résultats des études numériques. Dans ce contexte, le bassin d'essais le plus approprié se trouve alors être un bassin dit de génie océanique.

Un bassin de génie océanique est une cuve contenant habituellement de l'eau douce et doté sur un côté d'un dispositif de génération de vagues. Les vagues peuvent se propager selon une seule direction (dans l'axe du bassin) ou selon plusieurs directions (houles multidirectionnelles). Elles sont absorbées à l'extrémité du bassin généralement par un système se comportant comme une plage sur laquelle les vagues déferlent. Certains bassins peuvent être en eau de mer, d'autres peuvent être aussi dotés de dispositifs générant du vent au-dessus de la surface libre ou du courant mobilisant toute ou partie de la colonne d'eau. On peut citer pour l'exemple le bassin de génie océanique de l'École Centrale de Nantes qui est le plus grand en France. Long de 50 m, large de 30 m avec une profondeur constante de 5m, ce bassin en eau douce est doté de 48 volets qui permettent de générer des houles multidirectionnelles de plus de 1 mètre crête à creux.

Le choix de l'échelle de réduction est une première étape cruciale dans la préparation des essais car elle doit être compatible notamment avec les dimensions et les capacités techniques du bassin et les caractéristiques mécaniques du modèle réduit.

Afin de modéliser physiquement et de façon pertinente ces caractéristiques, il s'agit le plus souvent de respecter le rapport des forces extérieures appliquées au système étudié sur les forces de gravité : la valeur de ce ratio doit rester identique qu'elle que soit l'échelle considérée. Cette démarche correspond à un respect de la similitude de Froude : les dimensions sont alors réduites d'un facteur géométrique λ . Toutefois cette similitude implique également que le temps et la vitesse de la maquette sont dans un rapport de racine carrée de λ , les forces dans un rapport de λ au cube par rapport au prototype. Exemple : une machine réelle (appelée couramment prototype) qui est étudiée à l'échelle du 25ème voit ses dimensions divisées par 25, sa vitesse par 5 et ses forces divisées par $25^3=15\ 625$.

Mais que ce soit pour le prototype ou pour la maquette, les caractéristiques de l'eau sont quasiment identiques (en première approximation) : il en résulte une distorsion d'une autre similitude, dite de Reynolds, qui caractérise les effets de la viscosité de l'eau sur les écoulements autour du système étudié. Le nombre de Reynolds ne pouvant être respecté à la fois avec le prototype et la maquette, il s'agit alors de s'assurer que le régime des écoulements reste quand même identique ce qui revient à s'assurer la plupart du temps que les écoulements restent turbulents localement, à proximité de la maquette. Cette démarche conduit parfois à ajouter une faible rugosité sur des éléments de la maquette (bande de sable collée sur des profils, etc.) pour générer de la turbulence sur les parois.

Le choix de l'échelle de réduction doit également tenir compte des contraintes apportées par le bassin d'essai lui-même : les caractéristiques des houles générées, la taille et les coûts de fabrication de la maquette, etc. Dans le cas d'un système houlomoteur, il est courant de dissocier son comportement en situation opérationnelle normale, c'est à dire en situation de production pour des conditions environnementales usuelles (direction, hauteurs et périodes de houle, vitesse et direction du vent, du courant, etc.), de son comportement en situations extrêmes proches de son état limite ultime. On parle alors d'essais de survivabilité. Il est ainsi parfois nécessaire de réaliser deux maquettes d'échelles différentes pour étudier ces deux cas. Les dimensions de la configuration « production » sont alors choisies les plus grandes possibles afin de limiter les effets d'échelle qui peuvent fausser les extrapolations des données maquette aux données prototype. Ces effets d'échelle peuvent être observés dans des situations complexes au cours desquelles les phénomènes physiques ne sont pas correctement modélisés soit par méconnaissance initiale de ceux-ci, soit par la différence des milieux considérés (mer ouverte et milieu « infini » pour le prototype, parois et milieu « fini » pour la maquette).

Les essais en bassin de génie océanique impliquent donc la mise en œuvre d'une maquette sur la quelle de nombreuses catégories de mesures peuvent être réalisées. Citons tout d'abord les mesures liées à l'environnement de la maquette : la mesure des élévations de la surface libre donnant après analyse les caractéristiques statistiques et spectrales des houles (hauteurs, périodes, direction), les mesures du vent (module de vitesse, direction), celles des courants etc.

Les autres mesures correspondent à la caractérisation du comportement et des performances du système étudié. On peut citer notamment (liste non exhaustive) :

- les mouvements de la maquette dans la houle (les six degrés de liberté) obtenus par trajectographie ou par centrale inertielle ;
- les efforts globaux et locaux par des capteurs dynamométriques et des capteurs de pression ;
- les efforts d'ancrages si le système est flottant ;
- les efforts internes dans les matériaux par des jauges de contraintes ;
- les caractéristiques physiques permettant d'estimer les performances du convertisseur d'énergie (mesure de couple, de vitesse, de déformation, de courant électrique ou autre, en fonction de la technologie employée).

La diversité des machines à tester en modèle réduit implique de mettre en place au niveau international des méthodologies adoptées, approuvées et suivies par les différents protagonistes (concepteurs, chercheurs, responsables des bassins d'essais, etc.). Une démarche similaire a été initiée il y a très longtemps, près d'un siècle maintenant, dans le domaine de l'hydrodynamique navale et des bassins d'essais des carènes : elle est toujours active et les améliorations sont continues en particulier au sein de l'International Towing Tank Conference (ITTC). Le domaine des énergies marines étant juste émergent, les méthodologies d'essais ne sont pas encore totalement validées et approuvées.

2.2.1 Site d'expérimentation en mer

Le développement par jalons des nouvelles technologies de production d'énergie à partir de la houle nécessite une évaluation de la faisabilité technique et une estimation des coûts de production de l'énergie. Le passage par des campagnes d'essais de prototypes en conditions réelles précède les phases de commercialisation.

L'expérimentation en mer ouverte est une étape de validation du comportement de la machine de récupération de l'énergie des vagues et de ses performances en conditions d'exploitation opérationnelles. Cette étape peut correspondre à une démonstration du fonctionnement et de l'interaction de l'ensemble des composants du système lorsque c'est le cas d'un prototype. Les moyens de fabrication, d'installation et de démantèlement des systèmes font aussi l'objet d'essais en mer.

L'expérimentation en mer d'un système houlomoteur de production d'énergie nécessite l'accès au domaine maritime pour la réalisation des essais et aux infrastructures du réseau d'électricité. Le recueil des données mesurées et la conduite des campagnes

d'essais nécessitent l'accès à une base terrestre depuis laquelle seront opérées les prototypes en essais.

Les essais en mer de systèmes houlogénérateurs se font à des échelles significatives des prototypes par rapport aux caractéristiques des vagues rencontrées en conditions réelles. Typiquement, les prototypes testés en mer sont étudiés à des échelles allant du 1:3 à l'échelle 1:1. Ces prototypes intègrent la chaîne de conversion de l'énergie (Power Take Off) à bord et une multitude de capteurs et d'instruments de mesure qui permettront de relever l'état du système pendant les essais.

Les essais ont pour objectifs de tester et de valider les points suivants :

- Les procédures d'opérations en mer
- La qualité du courant électrique produit
- L'intégration au réseau électrique
- Les rendements de la chaîne de conversion
- L'efficacité des stratégies de contrôle
- La tenue des structures

Dans le cas des systèmes houlogénérateurs, ces essais peuvent s'effectuer sur des infrastructures dédiées dites Sites d'Expérimentations en Mer. Ces sites d'essais en mer sont des infrastructures qui permettent l'accès au domaine public maritime afin d'y effectuer des campagnes à caractère temporaire de caractérisation du prototype en mer. Le site d'essais en mer offre un accès à une zone balisée par des bouées de signalisation adaptées à la réglementation marine locale. La durée des campagnes d'essais en mer se prévoit entre 3 mois et 1 an. De telles infrastructures existent ou sont en cours de développement dans le monde. On peut citer par exemple en Ecosse le site « *European Marine Energy Centre* » (EMEC) construit en 2004 ou encore le SEM-REV, projet en construction porté par l'Ecole Centrale de Nantes au large du Croisic en France. Les sites d'essais disposent également de l'infrastructure électrique d'évacuation de l'énergie produite. Cela se traduit par la présence d'un câble haute tension statique posé ou enfouit sous le fond marin et d'un poste de livraison électrique possédant des cellules de raccordement et de protection des machines. Selon les tensions utilisées, les postes de livraison peuvent être équipés de transformateurs élévateurs de tension. Les essais électriques des systèmes houlogénérateurs correspondent aux analyses de système suivantes :

- Etats de charge du convertisseur selon les conditions d'opération
- Stabilité électrique
- Recueil des niveaux de production d'énergie et de seuillage

- Qualité du courant (tension en état permanent, flicker, variations lors des mises sous tension, harmoniques, puissance réactive, filtrage et comportement sur défaut)

Ces mesures s'effectuent au niveau du poste électrique de livraison et au sein du système de conversion d'énergie du prototype. Les données recueillies en mer transitent par fibre optique ou par haute fréquence jusqu'à la terre. Les mesures électriques se font selon les dispositions IEC en utilisant des instruments de qualimétrie électrique adéquats.

Tout comme les essais en bassin de génie océanique, les essais en mer requièrent une caractérisation de l'environnement à l'aide de mesures des paramètres océano-météorologiques. Ces mesures en milieu océanique se font à l'aide des instruments suivants :

- Bouée houlographe de mesure de houle directionnelle
- Courantomètres à effet doppler
- Capteurs PUV (pression et vitesses)
- Mesure 3D de vent en mer
- Marégraphes

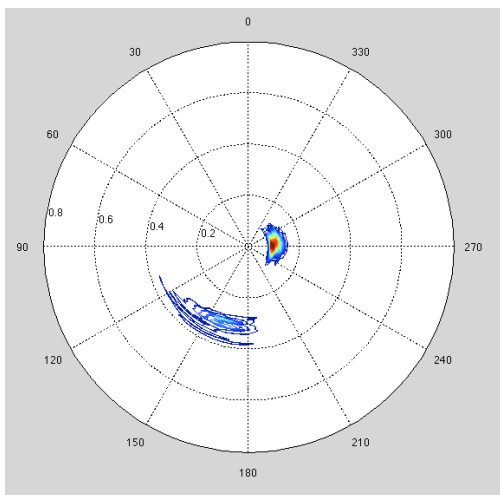


Figure 10 : Mesures de l'environnement, Spectre directionnel de houle au SEM-REV le 01/06/09 à 9h

Les mesures de mouvements du système se font à l'aide de différentes technologies de mesures inertielles embarquées à bord du prototype. Des tensiomètres peuvent être déployés sur les lignes d'amarrage afin de caractériser les efforts de chargement et la réponse des lignes.

Conclusion

Dans la première partie de cet article, on a tout d'abord exposé les outils de base pour modéliser la houle d'un point de vue mathématique. Notamment, ces modèles nous ont permis d'exprimer le flux d'énergie transportée par les vagues, ce qui nous a permis de mettre en évidence le gisement considérable d'énergie renouvelable que représente cette ressource.

Ensuite, on s'est intéressé au problème de la tenue à la mer de systèmes flottants, dont font partie bon nombre de systèmes de récupération de l'énergie des vagues. On a présenté les notions fondamentales en hydrodynamique d'efforts hydrostatique et hydrodynamique (en particulier les notions d'efforts de diffraction, radiation, masse d'eau ajoutée et amortissement de vagues), pour finir avec l'équation fondamentale de la tenue à la mer d'un corps flottant dans la houle, dans le domaine fréquentiel.

Enfin, on a présenté les moyens d'essai qui peuvent être utilisés pour tester les structures offshore telles que les récupérateurs de l'énergie des vagues, tant à échelle réduite qu'à grande échelle.

Pour finir, notons que ce qui a été présenté ici ne saurait constituer plus qu'une introduction aux aspects hydrodynamiques de la récupération de l'énergie des vagues. Au lecteur curieux d'en savoir plus, on conseille la lecture des ouvrages suivants :

B. Molin (2002) Hydrodynamique des Structures Offshore, Editions Technip.

J. Falnes (2000) Ocean Waves and Oscillating Systems : linear interaction including wave-energy extraction, Cambridge University Press.

J. Cruz (2008) Ocean Wave Energy – Current status and Future Perspectives, Springer.

Rappels

Les opérateurs vectoriels, divergence et rotationnel s'expriment pour un champ vectoriel ayant seulement deux composantes (suivant x et y) et dans une base cartésienne, par :

$$\operatorname{div} \vec{V} = \frac{\partial V_x}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial V_y}{\partial y} \vec{j}$$

$$\vec{\operatorname{rot}} \vec{V} = \left(\frac{\partial V_y}{\partial x} - \frac{\partial V_x}{\partial y} \right) \vec{k}$$

où i, j, k sont les trois vecteurs unitaires de la base cartésienne.