



UNIVERSITÉ CLAUDE BERNARD LYON 1

Rapport à 1 an

Contribution à l'étude d'un houlo-générateur : Le BILBOQUET

Par :

Sergio-Camilo MURILLO-CRUZ

Effectue au :

Laboratoire Ampère

Directeur de thèse : Guy CLERC (UCBL)
Co-directeur : Eric BLANCO (ECL)

6 Juillet 2012



TABLE DE MATIERES

INTRODUCTION	4
1. TECHNOLOGIES EXISTANTES	5
2. CONTEXTE GENERAL DE L'ETUDE	6
3. POSITIONNEMENT DU LABORATOIRE AMPERE : SUJET DE THESE	7
3.1. LE CAHIER DES CHARGES.....	7
3.2. VISION PROSPECTIVE	7
3.3. ACTIONS A MENER – CHRONOLOGIE	8
4. MODELISATION MECANIQUE DU HOULO-GENERATEUR.....	10
4.1. INTRODUCTION.....	10
4.2. ÉTUDE HYDRODYNAMIQUE ET HYDROSTATIQUE	10
5. PARAMETRES DU MODELE MECANIQUE	20
6. PREMIERS RESULTATS.....	21
7. CONCLUSION ET PERSPECTIVES	24
8. REFERENCES.....	25
ANNEXE A	26
ANNEXE B	29

TABLE DE FIGURES

Figure 1. Système houlo-generateur le <i>BILBOQUET</i>	6
Figure 2. Schéma général des convertisseurs d'électronique de puissance	7
Figure 3. Distribution générale de l'emploi du temps	9
Figure 4. Emploi du temps : première année	9
Figure 5. Emploi du temps : deuxième année.....	9
Figure 6. Emploi du temps : troisième année.....	10
Figure 7. Houle de nature sinusoidale.....	13
Figure 8. Degrés de liberté d'un corps flottant	14
Figure 9. Masse ajoutée, radiation et force d'excitation en p.u vers l'axe z en fonction de w (rad/sec).....	21
Figure 10. Module de la fonction de sensibilité de vitesse en fonction de w (rad/sec).	22
Figure 11. Module de la fonction de sensibilité en fonction de w (rad/sec) et chaque couple (masse ajoutée et radiation).	22
Figure 12. Vue sur le plan de la fréquence : module de fonction de sensibilité en fonction de w (rad/sec).....	23



Notations

B	Forces externes	P_{HD}	Champ de pression hydrodynamique dans le fluide
C_{ik}	Coefficients de restauration hydrostatique	P_{HS}	Champ de pression hydrostatique dans le fluide
F	Forces sur le houlo-generateur	\vec{r}	Vecteur de position du différentiel de surface du houlo-generateur par rapport au centre de gravité
F_{exi}	Forces d'excitation sur le degré de liberté i	R_{rik}	Matrice de radiation
g	Accélération de la gravité	t	Temps
h	Distance entre le niveau de la mer en repose et le fond marin	V	Champ de vitesse dans le fluide
H	Hauteur de la houle (crête - crête)	V_x	Composant vers l'axe x du champ de vitesse dans le fluide
H_{HDi}	Force et moments hydrodynamiques sur le degré de liberté i	V_y	Composant vers l'axe y du champ de vitesse dans le fluide
H_{HSi}	Forces et moments hydrostatique sur le degré de liberté i	V_z	Composant vers l'axe x du champ de vitesse dans le fluide
J_{ik}	Coefficients contenant l'effet du phénomène de radiation	α_i	Déplacement du houlo-generateur vers le degré de liberté i
k	Nombre d'onde ($2\pi/\lambda$)	λ	Longueur d'onde
L_{HDi}	Forces et moments dus à la houle incidente sur le degré i	ρ	Densité volumique du fluide
m	Masse du houlo-generateur	w	Vitesse angulaire
m_{ik}	Matrice de masse du houlo-generateur	μ	Coefficient de viscosité du fluide
m_{rik}	Matrice de masse additionnelle ou ajoutée du houlo-generateur	ϕ	Potentiel scalaire de vitesse
M	Moments sur le houlo-generateur	ϕ_I	Potentiel scalaire de vitesse de la houle incidente
\vec{n}	Vecteurs unitaires vers les 6 degrés de liberté	ϕ_D	Potentiel scalaire de vitesse du au phénomène de diffraction
N_{HDi}	Force et moments hydrodynamiques dus au phénomène de radiation	ϕ_R	Potentiel scalaire de vitesse du au phénomène de radiation
P	Champ de pression dans le fluide	∇	Operateur Nabla
		∇^2	Laplacien



Introduction

La prise de conscience des effets des émissions de gaz à effet serre a contribué à la création d'accords et engagements pour réduire ou limiter la consommation de ressources non-renouvelables et augmenter l'utilisation d'énergies alternatives en cherchant un développement durable. En France particulièrement, les Grenelles de l'environnement et de la mer (2007 – 2009) [1] ont été promulgué pour réduire par facteur de quatre les émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2050. Ces Grenelles, affirment que la recherche joue un rôle important dans l'innovation et la préservation de l'environnement en privilégiant les énergies renouvelables comme l'énergie à partir des mers.

En termes énergétiques, la terre reçoit en permanence 174 millions de Gigawatts-heure (10^9 watts-heure) du soleil, dont le 30% est réfléchi [2]. L'énergie totale absorbée est de l'ordre de 1067 millions de TéraWatts-heure¹ par an ($\sim 3841 \text{ ZJ}^2$) laquelle représente plus de 7000 fois l'énergie totale demandé dans l'année 2008 [3].

Globalement, l'énergie houlomotrice disponible et techniquement exploitable selon le Conseil Mondial de l'Énergie, représente environ 10% de la demande d'électricité mondiale [4], soit 1400 TéraWatts-heure par an. En France métropolitaine, le potentiel techniquement exploitable peut être estimé à un peu moins de 10% de l'électricité consommée (à peu près 550 TW-h par an), soit 40 TW-h par an.

Ce premier rapport contextualise le développement d'un nouveau type de système de génération d'électricité par récupération de l'énergie des houles. La première partie montre les différents systèmes de récupération de l'énergie des houles existantes et classifiés par le type de technologie utilisée. La deuxième partie contextualise en général l'étude de ce nouveau système. La troisième, montre le positionnement du Laboratoire Ampère par rapport à cette étude et les différentes perspectives des travaux de recherche et les actions visées, à mener chronologiquement. Les deux dernières parties se concentrent sur mes premières contributions de recherche obtenues après trois mois d'étude³ et notamment sur l'étude hydrodynamique et hydrostatique afin de modéliser mécaniquement le comportement du système houlo-générateur.

¹ 1 TW-h = 3.6×10^{15} Joules.

² 1 ZJ = 10^{21} Joules.

³ Démarrage de la thèse 2 Avril 2012.



1. Technologies Existantes

Depuis les années quatre-vingt, différents systèmes de récupération de l'énergie des houles ont été conçus. Parmi ces systèmes, on peut distinguer trois grands groupes :

- *Systèmes à rampe de déferlement :*

Dans ces systèmes, la houle déferle sur une rampe qui remplit un réservoir. L'eau stockée dans le réservoir permet d'entraîner une turbine. La plus grande partie de ces systèmes sont on-shore, tels que *TAPCHAN (Tapered Channel)* [5] de 350 kW et le *SSG (Seawave Slot-cone Generator)* [6] de 150 kW en Norvège. De type off-shore, le *Wave Dragon* [7] de 20 kW au Portugal.

- *Systèmes à colonne d'eau oscillants :*

Dans ces systèmes, la houle comprime un volume d'air contenu dans une chambre à air ou colonne. La variation de pression sur le volume d'air entraîne deux turbines type Wells en contre-rotation pour maintenir un flux qui ne change pas de signe quel que soit le sens de circulation du flux d'air. Systèmes on-shore comme le *LIMPET* [8] de 4 MW kW et off-shore comme le *OCEANLINX MK1* [9] de 300 kW en Australie.

- *Systèmes flottants :*

Cette catégorie concerne les systèmes à corps mus par la houle. En générale, ils sont composés par une partie mobile qui oscille avec la houle et une partie fixe, lesquels permettent d'avoir un mouvement relatif qui est utilisé pour entraîner une génératrice. Systèmes déjà développés comme le *PELAMIS* [10] de 750 kW au Portugal, le *SEAREV* [11] de 500 kW en France, et en train de développement comme le *BILBOQUET*.

La grande importance du développement du système le *BILBOQUET*, est la différence de puissance installée, 2,4 MW par rapport aux existants et par ailleurs, le *BILBOQUET* est le seul système qui compte avec un plateau pesant (embase) flottant.

2. Contexte général de l'étude

Le projet consiste à développer un nouveau type de système de génération d'électricité par récupération de l'énergie de la houle, à haut rendement, par mouvement relatif d'un flotteur guidé entraînant quatre génératrices : Le *BILBOQUET*. Le *BILBOQUET* est un système houlomoteur développé par *D2M Consultants* et les partenaires suivants :

- *CMD (Engrenages)*
- *CERVVAL (Modélisation et simulation)*
- *Adeneo (Electronique de puissance)*
- *Oceanide*
- *Bureau Veritas (Normes)*
- *IFREMER (Test en bassin)*
- *École Nationale d'Ingénieurs de Brest ENIB (Recherche)*
- *Université Claude Bernard Lyon 1 – Laboratoire Ampère (Recherche)*

Le *BILBOQUET* est constitué d'un flotteur guidé qui se déplace le long d'une colonne flottante et ancrée. Le flotteur est équipé de crémaillères qui actionnent les pignons des génératrices situées dans une capsule à la partie supérieure de la colonne. La colonne est équipée à sa partie inférieure d'un plateau pesant permettant à la fois un amortissement hydrodynamique et un ancrage par 3 points qui contribue à une grande stabilité verticale.

Le *BILBOQUET* a été conçu pour une puissance maximale de 9,6 MW, soit 2,4 MW par génératrice. Les génératrices sont de type machine synchrone à aimants permanents et constituées chacune de trois voies d'enroulement par phase en phase, soit trois systèmes triphasés par génératrice. Chaque système triphasé a deux convertisseurs (redresseur côté machine et onduleur côté réseau) en mode « *back-to-back* » permettant la transférence de puissance dans le deux sens.

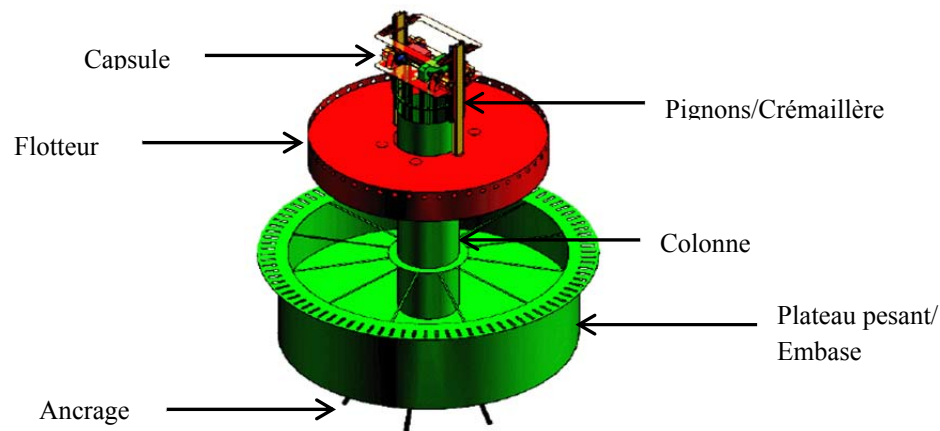


Figure 1. Système houlomoteur le *BILBOQUET*

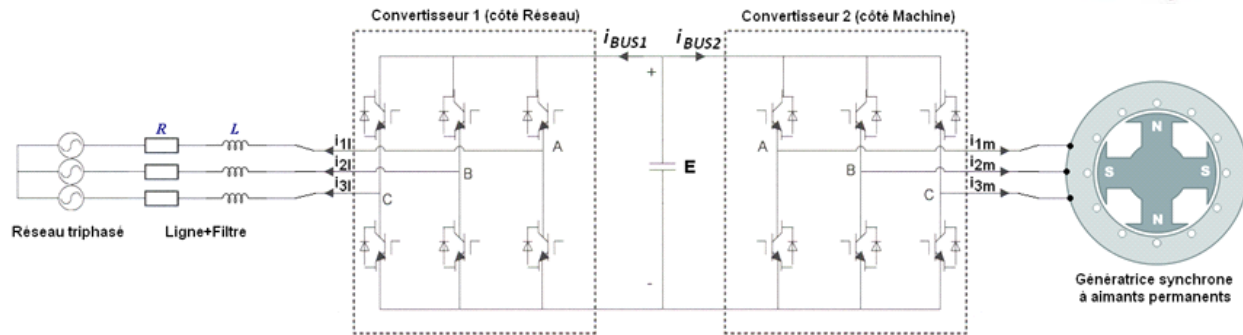


Figure 2. Schéma général des convertisseurs d'électronique de puissance

3. Positionnement du Laboratoire Ampère : Sujet de Thèse

3.1. Le cahier des charges

Le positionnement du Laboratoire Ampère est sur la conception de la commande des convertisseurs d'électronique de puissance. Le sujet de thèse vise à développer une loi de pilotage du générateur en régime dynamique qui cherche à tout instant à extraire un maximum d'énergie de la source mécanique à forte variabilité (la houle).

Les travaux de recherche se situent à plusieurs niveaux : théorie, simulation et validation expérimentale sur un banc d'essai du laboratoire. Le travail théorique consiste à développer la loi de commande de l'ensemble convertisseur-génératrice adaptée aux contraintes du houlogénérateur le *BILBOQUET*. Le travail de simulation vise à tester les différentes stratégies de commande dans les différents modes de fonctionnement (normal et dégradé) sur l'outil MATLAB/Simulink. Le dernier travail sera de mettre au point les lois de commande et valider les résultats de simulations. Ces travaux se feront sur un banc machine électrique de faible puissance (< 5kW).

3.2. Vision Prospective

En fonction du positionnement du *Laboratoire Ampère* à la contribution du développement de ce nouveau système de récupération de l'énergie des houles, les travaux suivants sont proposés afin de traiter tous les aspects généraux de la modélisation.



Modélisation mécanique du système houlo-generateur :

Il s'agit de trouver un modèle mécanique suffisant pour représenter le comportement du système houlo-generateur afin de caractériser, la perturbation sur la chaîne de conversion électromécanique. Ce modèle devra être suffisamment complet pour reproduire au mieux les mouvements du flotteur et suffisamment simple pour être implémenter pour les tests en simulation et la validation sur le banc d'essai.

Modélisation électrique et mécanique de la machine synchrone à aimants permanents :

Il s'agit de trouver les différents modèles autant mécaniques qu'électriques pour les différents modes de fonctionnement (normal et dégradé).

Modélisation électrique des convertisseurs d'électronique de puissance et du réseau électrique :

Il s'agit de trouver le modèle moyen des convertisseurs d'électronique de puissance (redresseur et onduleur) et le modèle dynamique du réseau électrique.

Sur le modèle complet du système houlo-generateur, nous travaillerons sur la définition des différentes stratégies de commande dans les modes de fonctionnement normal et dégradé. Ces modes fonctionnement seront traités en fonction des différentes contraintes mécaniques sur l'ensemble flotteur – plateau pesant et les normes qui réglementent l'utilisation des systèmes de récupération de l'énergie des houles.

3.3. Actions à Mener – Chronologie

Dans le but de mettre en place tous les objectifs du sujet de thèse, les différentes actions à mener ont été placées chronologiquement dans l'horizon de trois ans (36 mois).

Sur cet horizon, nous avons défini trois grands axes de travail. Les premiers douze mois sont dédiés à la définition des modèles de simulation des différentes composantes du système houlo-generateur (flotteur-plateau pesant, machine synchrone à aimants permanents, redresseur-onduleur et le réseau électrique). Les douze mois suivants, à la définition des différentes stratégies de commande des convertisseurs et la simulation sur le modèle complet du houlo-generateur. Les derniers douze mois, à la validation des résultats sur le banc d'essai et à la rédaction du mémoire de thèse.

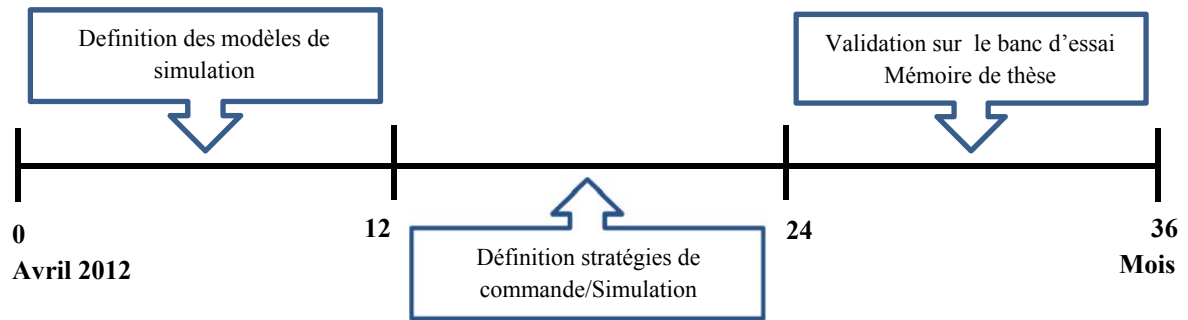


Figure 3. Distribution générale de l'emploi du temps

Première année : Elle est divisée en deux parties, une partie de cinq mois sur la modélisation mécanique du houlo-generateur (flotteur – plateau pesant) et l'autre de sept mois sur la définition du modèle dynamique des autres composantes du système houlo-generateur, c'est-à-dire, la machine synchrone à aimants permanents, les convertisseurs redresseur-onduleur et le réseau électrique. Chacune de ces parties sont accompagnées d'une étude bibliographique du sujet.

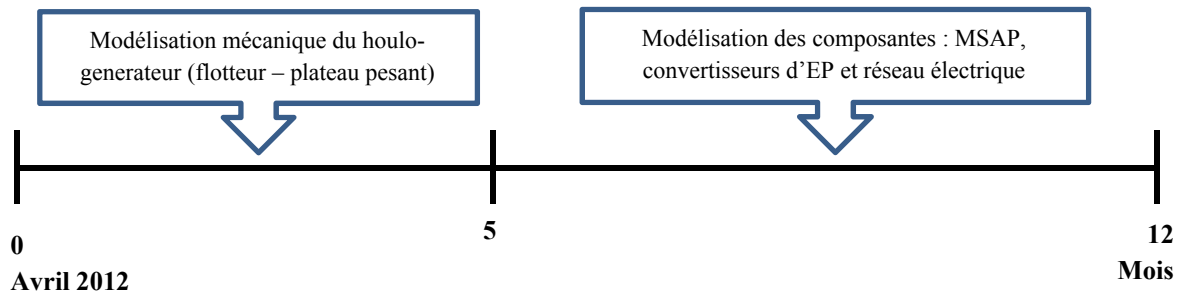


Figure 4. Emploi du temps : première année

Deuxième année : Elle est divisée en trois parties, la première partie de 4 mois au développement du modèle complet du système houlo-generateur, la deuxième de 6 mois à la définition des différentes stratégies de commande des convertisseurs d'électronique de puissance et la dernière de 2 mois aux résultats de simulations sur l'outil MATLAB/Simulink.

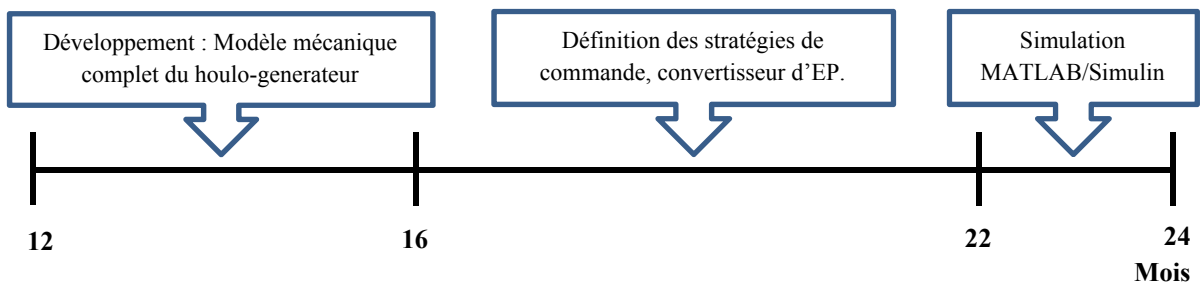
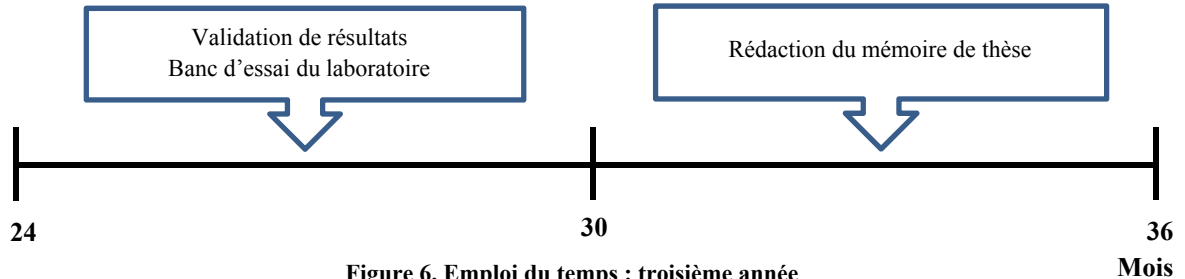


Figure 5. Emploi du temps : deuxième année

Troisième année : Elle est divisée en deux parties, une de 6 mois à la validation des résultats de mise en point des lois de commande sur le banc d'essai et l'autre à la rédaction de la mémoire de thèse.



4. Modélisation Mécanique du Houlo-generateur

4.1. Introduction

Les premiers travaux de recherche ont été menés afin de traiter la mécanique de fluides du corps flottant dans un fluide. Ces travaux consistent à faire une étude hydrodynamique et hydrostatique afin d'établir les forces et moments sur le corps flottant.

L'étude part des équations générales du mouvement d'une particule de fluide « *Les équations de Navier – Stokes* ». Des hypothèses sont formulées en vue de simplifier et linéariser ces équations et de trouver une expression du champ de pression dans le fluide.

L'intégration du champ de pression sur la surface du corps mouillé permet d'établir les forces et moments sur le corps flottant. Ces forces et moments sont classifiés en hydrodynamiques et hydrostatiques. Cela montre la nature et l'origine de chacun des termes de l'équation mécanique.

L'équation mécanique du comportement du houlo-generateur (flotteur – plateau pesant) est présentée autant dans le domaine fréquentiel que dans le domaine temporel.

4.2. Étude Hydrodynamique et Hydrostatique

Les forces et moments sur un corps flottant sont trouvés grâce au champ de pression sur le fluide. Ce champ est défini à partir des équations générales de la mécanique de fluides « *Les équations de Navier-Stokes* » [12]. Ces équations expliquent (1) et (2).



$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (\text{Equation de continuité}) \quad (1)$$

$$\rho \frac{dV}{dt} = -\nabla P + \mu \nabla^2 V + \rho B \quad (\text{Bilan de la quantité de moment}) \quad (2)$$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial t} + (V \cdot \nabla) V \quad (\text{Dérivée totale du champ de vitesse}) \quad (3)$$

(1) est l'équation de continuité et (2) est l'équation de bilan de la quantité de moment. L'équation (2) est non-linéaire à cause du terme de dérivée totale du champ de vitesse du fluide (3). Pour cela, certaines hypothèses ont été considérées afin d'éliminer la non-linéarité et de simplifier les équations.

- *Fluide incompressible* : Considérer la densité du fluide constante. Par ailleurs, on parlera de la conservation de la masse $\nabla \cdot V = 0$. De (1) :

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

- *Fluide non-visqueux* : Négliger les efforts dus à la viscosité du fluide. $\mu = 0$. De (2).

$$\mu \nabla^2 V = 0 \quad (5)$$

- *Écoulement irrotationnel* : Cette hypothèse permet d'utiliser la théorie du potentiel scalaire du champ de vitesse en négligeant le phénomène de turbulence dans le fluide. $\nabla \otimes V = 0$ et $\nabla \phi = V$.

$$\nabla \times V = \left(\frac{\partial V_z}{\partial y} - \frac{\partial V_y}{\partial z} \right) i + \left(\frac{\partial V_x}{\partial z} - \frac{\partial V_z}{\partial x} \right) j + \left(\frac{\partial V_y}{\partial x} - \frac{\partial V_x}{\partial y} \right) k = 0 \quad (6)$$

A partir de la théorie du potentiel scalaire, le champ de vitesse est défini :

$$V = \nabla \phi = \frac{\partial \phi}{\partial x} i + \frac{\partial \phi}{\partial y} j + \frac{\partial \phi}{\partial z} k \quad (7)$$

Avec ϕ le potentiel scalaire de la vitesse V .



- $\frac{H}{h} \ll 1$: Si la hauteur de la houle est petite par rapport à la profondeur de la mer les termes non-linéaires de la dérivée totale $(V \cdot \nabla)V$ sont négligeables (eaux profondes) [13].

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_x}{\partial t} &\gg V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_x}{\partial z} \\ \frac{\partial V_y}{\partial t} &\gg V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_y}{\partial z} \quad (8) \\ \frac{\partial V_z}{\partial t} &\gg V_x \frac{\partial V_z}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_z}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} \end{aligned}$$

Alors, la dérivée totale du champ de vitesse peut être approximée par sa dérivée partielle par rapport au temps.

$$\frac{dV}{dt} \approx \frac{\partial V}{\partial t} \quad (9)$$

(10) et (11) sont les équations de Navier – Stokes simplifiées de (1) et (2) à partir des hypothèses précédents.

$$\nabla \cdot V = \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = \nabla^2 \phi = 0 \quad (\text{Equation de continuité}) \quad (10)$$

$$\rho \frac{\partial V}{\partial t} = -\nabla P - \rho g k \quad (\text{Bilan de la quantité de moment}) \quad (11)$$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\partial V_x}{\partial t} i + \frac{\partial V_y}{\partial t} j + \frac{\partial V_z}{\partial t} k \quad (\text{Dérivée totale du champ de vitesse}) \quad (12)$$

(13) est l'équation du champ de pression sur un différentiel de fluide.

$$P = -\rho \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} + gz \right) \quad (13)$$

Afin de résoudre l'équation précédente, le potentiel scalaire du champ de vitesse doit être déterminé en fonction de tous les phénomènes qui interviennent entre le houlo-générateur et le fluide.

Les phénomènes suivants sont propres à la nature des ondes (houles) :

- *Interférence* : La superposition des ondes dans le fluide. Il n'est pas pris en compte puisque n'intervient pas sur le mouvement du houlo-générateur.
- *Réflexion* : Le reflet des ondes dû à un obstacle. Il est négligeable parce que le houlo-générateur est considéré, comme « petit » par rapport à la longueur d'onde de la houle.
- *Réfraction* : La déviation d'une onde lorsqu'elle change de milieu. Il est négligeable puisque il n'y a aucun changement de milieu.
- *Diffraction* : Considérer un obstacle (houlo-générateur) comme une source secondaire qui renvoie des ondes avec les mêmes caractéristiques de l'onde incidente.

Par rapport au corps flottant :

- *Radiation* : Création des ondes dans le fluide due au mouvement du corps flottant. En autre termes, c'est la perturbation du houlo-générateur dans le fluide.

En considérant une hypothèse additionnelle, la houle de nature sinusoïdale (14) (cf. Figure 7), la diffraction et la radiation peuvent être découplées en utilisant un potentiel scalaire pour chacun des phénomènes.

$$z(x, t) = f(x)e^{j\omega t} \quad (14)$$

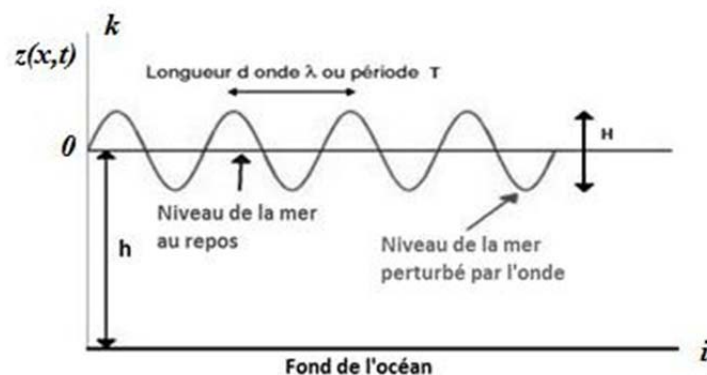


Figure 7. Houle de nature sinusoïdale

Pourtant, En [14] le potentiel scalaire total est la superposition des potentiels scalaires individuels (15). ϕ_D et ϕ_R sont les potentiels scalaires des phénomènes de diffraction et radiation respectivement. ϕ_I représente le potentiel scalaire de l'onde (houle) incidente⁴.

$$\phi = \phi_I + \phi_D + \phi_R \quad (15)$$

En général, un corps libre flottant dans un fluide a 6 degrés de liberté, 3 de déplacement (1,2,3) et 3 de rotation vers les axes x, y, z . (1 – Cavelement, 2 – Embardeée, 3 – Pilonnement, 4 – Roulis, 5 – Tangage, 6 - Lacet).

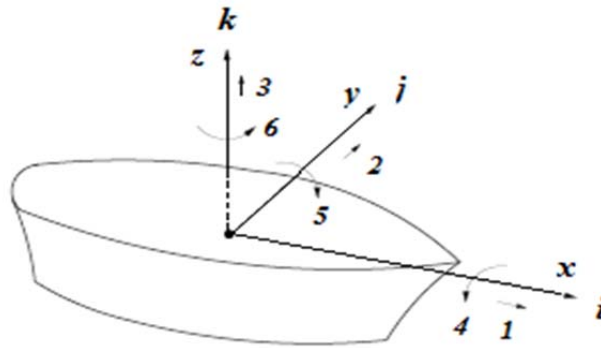


Figure 8. Degrés de liberté d'un corps flottant

On définira les vecteurs unitaires vers les 6 degrés de liberté $(n_1, n_2, n_3, n_4, n_5, n_6)$ de la forme suivante :

$$\vec{n} = (n_1, n_2, n_3), \quad \vec{r} \otimes \vec{n} = (n_4, n_5, n_6) \quad (16)$$

Avec \vec{r} le vecteur de position d'élément de surface par rapport au système de coordonnées. α_i est le déplacement du corps dans le degré de liberté i .

Chaque potentiel scalaire doit satisfaire l'équation de continuité (10) et des conditions aux limites suivantes :

- Pour ϕ_I : La vitesse normale d'une particule de fluide au fond de l'océan doit être égale à zéro. Par ailleurs, les variations de pression sur la surface de la mer par rapport au temps sont négligeables (18).⁵

⁴ Le calcul de ϕ_I est montré dans l'annexe A.

⁵ Voir l'Annexe A.



$$V_z = \frac{\partial \phi}{\partial z} \Big|_{z=-h} = 0 \quad (17) \quad \frac{dP}{dt} \Big|_{z=0} = 0 \quad (18)$$

- Pour ϕ_D : La vitesse normale d'une particule de fluide près de la surface du houlo-generateur en considérant la houle incidente doit être égale à zéro. Également, les variations de pression sur la surface de la mer par rapport au temps sont négligeables (18). La surface considérée est celle qui est en contact avec le fluide en supposant le houlo-generateur sans mouvement.

$$\frac{\partial}{\partial n} (\phi_I + \phi_D) \Big|_{Surface} = 0 \quad (19)$$

- Pour ϕ_R : La vitesse normale d'une particule de fluide près de la surface du houlo-generateur doit être égale à la vitesse du dernier. En plus, l'équation (18) doit être satisfaite :

$$\frac{\partial \phi_R}{\partial n} = \frac{\partial \alpha_i}{\partial t} \Big|_{Surface} \quad (20)$$

α_i est le mouvement du système houlomoteur vers le degré de liberté i .

$$\alpha_i; \quad i=1,2,3,\dots,6 \quad (21)$$

En plus des conditions ci-dessus, les potentiels scalaires ϕ_D et ϕ_R doivent être nuls l'infini (conservation de l'énergie) (22).

$$\phi_{D,R}(r = \infty) = 0 \quad (22)$$

Une fois les potentiels scalaires calculés, les forces et moments sur le houlo-generateur sont calculés en intégrant l'équation de pression (13) sur la surface de contact avec le fluide.

$$F = \iint_S \vec{n} P ds \quad (23)$$

$$M = \iint_S \left(\vec{r} \times \vec{n} \right) P ds \quad (24)$$

Avec,

$$\vec{n} = (n_1, n_2, n_3), \quad \vec{r} \times \vec{n} = (n_4, n_5, n_6) \quad (16)$$



$$\alpha_i; \quad i = 1, 2, 3, \dots, 6 \quad (21)$$

Le champ de pression du fluide (13) est décomposé en deux composantes : la première qui dépend du temps appelée composante hydrodynamique (25) et la deuxième appelée composante hydrostatique (26).

$$P_{HD} = -\rho \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} \right) = -\rho \frac{\partial}{\partial t} (\phi_I + \phi_D + \phi_R) \quad (25)$$

$$P_{HS} = -\rho g z \quad (26)$$

Avec,

$$\phi_R = \sum_{i=1}^6 \alpha_i \phi_i \quad (27)$$

ϕ_i est le potentiel scalaire et α_i le déplacement du houlo-générateur dans le degré de liberté i .

- *Forces et moments hydrodynamiques :*

Si les potentiels scalaires sont représentés de la forme suivante :

$$\phi(x, y, z, t) = \text{Re} \left[\hat{\phi}(x, y, z) e^{j\omega t} \right] \quad (28)$$

Alors, le champ de pression hydrodynamique devient :

$$P_{HD} = -\rho \text{Re} \left[j\omega \left(\hat{\phi}_I + \hat{\phi}_D + \sum_{i=1}^6 \hat{\alpha}_i \hat{\phi}_i \right) e^{j\omega t} \right] \quad (29)$$

En intégrant l'équation de pression hydrodynamique (29) en (23) et (24), (30) est l'expression des forces et moments hydrodynamiques sur le houlo-générateur par chaque degré de liberté i .

$$H_{HDi} = \iint_S n_i P_{HD} ds = -\rho \iint_S n_i \left[j\omega \left(\hat{\phi}_I + \hat{\phi}_D + \sum_{k=1}^6 \hat{\alpha}_k \hat{\phi}_k \right) \right] ds \quad (30)$$

(30) est décomposée en deux, la première partie en groupant l'effet de la houle incidente et la diffraction. La deuxième, contenant l'effet du phénomène de radiation. :

$$H_{HDi} = L_{HDi} + N_{HDi} \quad (31)$$

Avec,



$$L_{HDi} = -\rho \iint_S n_i \left[j\omega \left(\hat{\phi}_I + \hat{\phi}_D \right) \right] ds \quad (32)$$

$$N_{HDi} = -\rho \iint_S n_i \left[j\omega \sum_{k=1}^6 \hat{\alpha}_k \hat{\phi}_k \right] ds \quad (33)$$

L_{HDi} sont les forces et moments sur le houlo-generateur dus à la houle incidente et on les désignera comme les forces d'excitation dans le degré de liberté i (34). N_{HDi} sont les forces et moments dus au mouvement de réaction du houlo-generateur.

$$L_{HDi} = -\rho \iint_S n_i \left[j\omega \left(\hat{\phi}_I + \hat{\phi}_D \right) \right] ds = F_{exi}(H, \omega) \quad (34)$$

En [14], N_{HDi} est décomposé en deux termes, un proportionnel à l'accélération et l'autre proportionnel à la vitesse du houlo-generateur.

$$N_{HDi} = \sum_{k=1}^6 J_{ik} \hat{\alpha}_i = \sum_{k=1}^6 \left[\omega^2 m_{rik}(\omega) - j\omega R_{rik}(\omega) \right] \hat{\alpha}_i \quad (35)$$

Avec,

$$m_{rik} = \begin{bmatrix} m_{r11} & \cdot & \cdot & m_{r1k} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \\ \cdot & \cdot & \cdot & \\ m_{ri1} & \cdot & \cdot & m_{rik} \end{bmatrix} \quad i, k = 1, 2, 3, \dots, 6$$

$$R_{rik} = \begin{bmatrix} R_{r11} & \cdot & \cdot & R_{r1k} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \\ \cdot & \cdot & \cdot & \\ R_{ri1} & \cdot & \cdot & R_{rik} \end{bmatrix} \quad i, k = 1, 2, 3, \dots, 6$$
(36)

m_{rik} et R_{rik} sont les termes de masse additionnelle ou masse ajoutée, et de radiation dus aux mouvements de réaction du houlo-generateur.

- *Forces et moments hydrostatiques :*

En intégrant l'équation de pression hydrostatique (26) en (23) et (24), (37) est l'expression des forces et moments hydrostatiques par chaque degré de liberté i .

$$H_{HSi} = \iint_S n_i P_{HS} ds = -\rho g \iint_S n_i z ds \quad (37)$$



L'équation (37) peut être représentée de la forme suivante :

$$H_{HSi} = -\sum_{k=1}^6 C_{ik} \hat{\alpha}_i \quad (38)$$

C_{ik} sont les coefficients de restauration hydrostatique du houlo-generateur (pouce d'Archimède).

$$C_{ik} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & C_{1k} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \dots \\ 0 & 0 & C_{33} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & C_{ik} \end{bmatrix} \quad i, k = 1, 2, 3, \dots, 6 \quad (39)$$

En ajoutant la masse du houlo-generateur et à partir des forces et moments hydrodynamiques et hydrostatiques, le modelé mécanique du houlo-generateur dans le domaine fréquentiel est donné par l'équation (40).

$$\sum_{k=1}^6 [-w^2(m_{ik} + m_{rik}(w)) + jwR_{ik}(w) + C_{ik}] \alpha(w) = F_{exk}(H, w) \quad (40)$$

Avec m_{ik} la matrice de masse du houlo-generateur et m_{rik} la matrice de masse additionnelle.

$$m_{ik} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & & \\ 0 & m & 0 & I_{gravité} & \\ 0 & 0 & m & & \\ & & & & \\ & -I_{gravité} & & I_{coordonnées} & \end{bmatrix} \quad i, k = 1, 2, 3, \dots, 6 \quad (41)$$

m est la masse du houlo-generateur. $I_{gravité}$ et $I_{coordonnées}$ coordonnes sont les moments d'inertie par rapport au centre de gravité et au système de coordonnes [16].

En [15], l'équation (40) est représentée dans le domaine temporel par l'équation (42). La masse additionnelle et le terme de radiation en fonction de la fréquence sont remplacés par un



terme constant et calculé à la fréquence infini et une intégral de convolution entre la réponse impulsionnelle et la vitesse du houlo-generateur respectivement.

$$\sum_{k=1}^6 \left[(m_{ik} + m_{rik}(\infty)) \frac{d^2 \alpha_k(t)}{dt^2} + \int_0^t K_{rik}(t-T) \frac{d\alpha_k(T)}{dT} dT + C_{ik} \alpha_k(t) \right] = F_{exk}(H, w, t) \quad (42)$$

Avec,

$$K_{rik}(t-T) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} R_{rik}(w) \cos[w(t-T)] dw \quad (43)$$

$m_{rik}(\infty)$ est la matrice de masse additionnelle évaluée à la fréquence infini. K_{rik} est la réponse impulsionnelle et résulte d'une intégrale de Fourier inverse sur le R_{rik} .

L'intégrale de surface de la pression, montre que tous les paramètres de l'équation (40) dépendent fortement de la géométrie du houlo-generateur.

Si l'on considère que le système d'ancrage du houlo-generateur est suffisant pour supprimer les mouvements hors du pilonnèment (déplacement vers l'axe z), l'équation (40) et (42) peuvent être représentés par (44) et (45) respectivement :

$$\left[-w^2(m_{33} + m_{r33}(w)) + jwR_{33}(w) + C_{33} \right] \alpha_3(w) = F_{ex3}(H_s, T_p) \quad (44)$$

$$(m_{33} + m_{r33}(\infty)) \frac{d^2 \alpha_3(t)}{dt^2} + \int_0^t K_{r33}(t-T) \frac{d\alpha_3(T)}{dT} dT + C_{33} \alpha_3(t) = F_{ex3}(H, w, t) \quad (45)$$

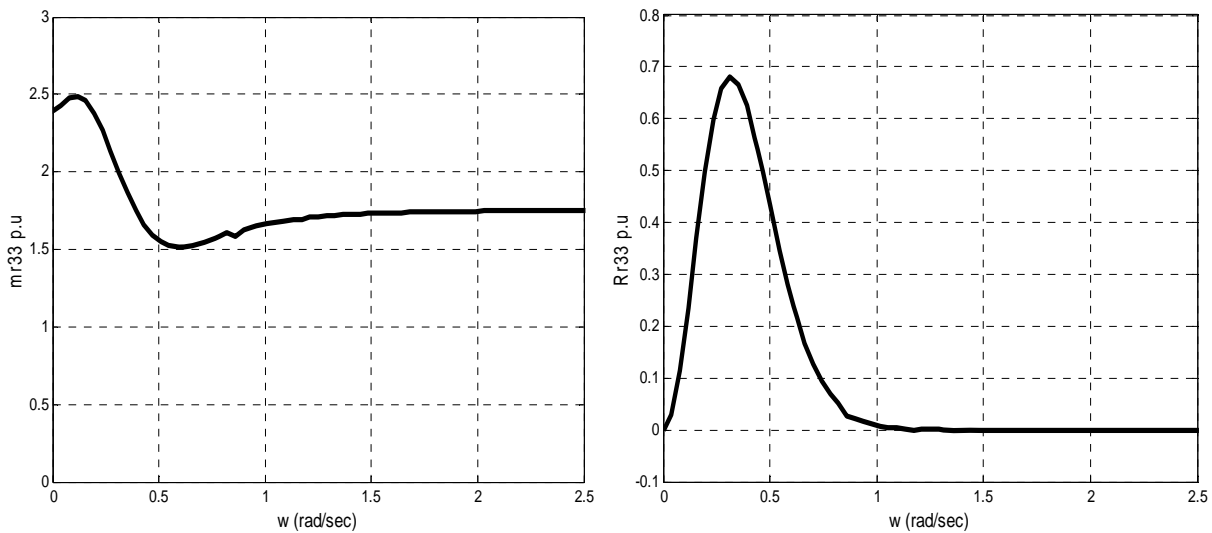
Avec,

$$K_{rik}(t-T) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} R_{rik}(w) \cos[w(t-T)] dw \quad (46)$$

5. Paramètres du modèle mécanique

De la section précédent, le modèle mécanique du houlo-generateur (flotteur – plateau pesant) a été trouvé, équations (44) et (45). Les paramètres de ces deux équations ont une forte dépendance de la géométrie du houlo-generateur. Afin d'établir les différents paramètres, nous avons utilisé le logiciel WAMIT [17]. Il a été développé par le MIT (*Michigan Institute of Technology*).

Ce logiciel permet calculer les paramètres en fonction de la fréquence de pulsation de la houle incidente, son amplitude et la géométrie du houlo-generateur⁶. Les calculs en WAMIT sont faits sur un flotteur cylindrique de rayon 1 m et hauteur de 0,5 m pour une question de discrétisation de la géométrie et du temps de simulation. Ses résultats sont sans dimension et il faut les extrapoler à la dimension réelle du houlo-generateur avec les facteurs d'échelle [16].



⁶ Les valeurs des paramètres sont montrées dans l'annexe B.

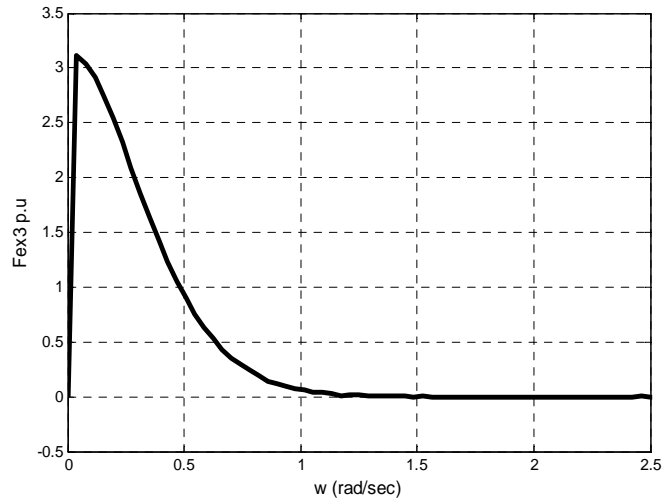


Figure 9. Masse ajoutée, radiation et force d'excitation en p.u vers l'axe z en fonction de w (rad/sec).

6. Premiers résultats

Dans ces premiers résultats, nous avons concentré notre attention sur la variabilité du rapport entre la vitesse du houlo-générateur et la force d'excitation en fonction de la fréquence de pulsation de la houle incidente. A partir de l'équation (44) :

$$\frac{\dot{\alpha}_3(w)}{F_{ex3}(H_s, T_p)} = \frac{jw}{[-w^2(m_{33} + m_{r33}(w)) + jwR_{33}(w) + C_{33}]} \quad (47)$$

L'équation (47) s'appelle la fonction de sensibilité de la réponse de vitesse. Nous parlons de fonction de sensibilité puisque elle n'est pas une vraie fonction transfère pour la dépendance en fréquence de certains paramètres. La Figure 10, montre la variation du module de cette fonction par rapport à la fréquence.

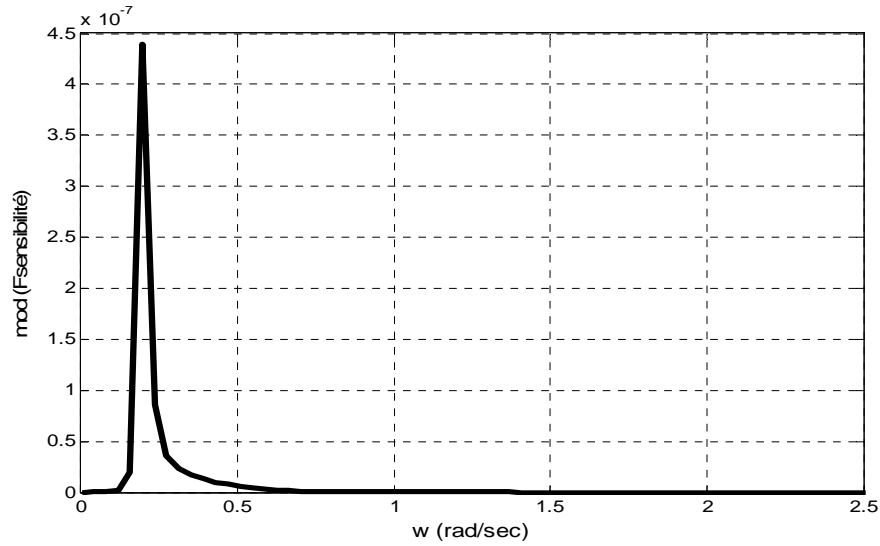


Figure 10. Module de la fonction de sensibilité de vitesse en fonction de w (rad/sec).

La forte variabilité de la source mécanique (la houle) ne permet pas avoir une seule caractérisation de la réponse en vitesse. Pourtant, si l'on considère différentes houles monochromatiques (une seule fréquence de pulsation par houle), les paramètres dépendants de la fréquence dans la fonction de sensibilité (47) deviennent constants pour chaque fréquence de houle.

La Figure 11, montre le module de cette fonction de sensibilité en fonction de deux variables. Dans un axe, la fréquence angulaire et dans l'autre les différents couples (m_{r33}, R_{r33}) calculés pour chaque fréquence de pulsation de houle.

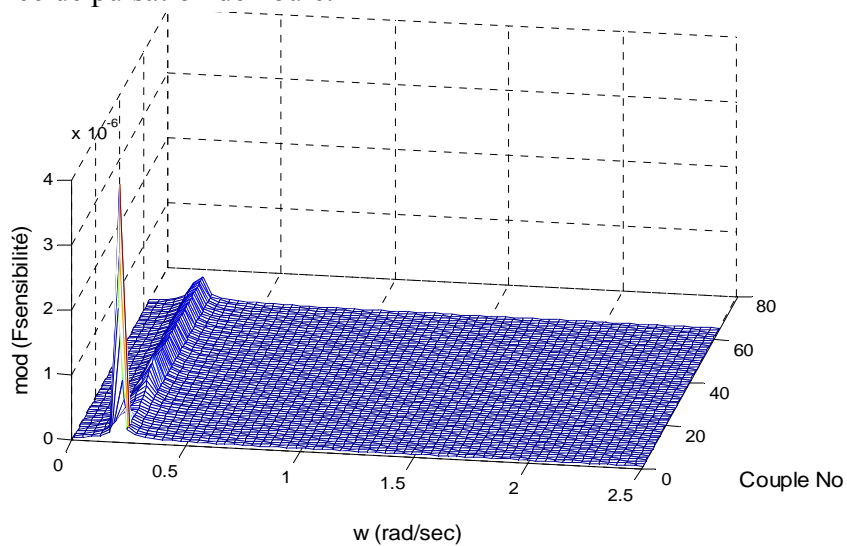


Figure 11. Module de la fonction de sensibilité en fonction de w (rad/sec) et chaque couple (masse ajoutée et radiation).

Maintenant, nous sommes intéressés de voir la représentation du module de la fonction de sensibilité pour tous les couples (m_{r33}, R_{r33}) . Une vue du module de la fonction de sensibilité (cf. Figure 11) sur le plan de la fréquence montre cette représentation, Figure 12.

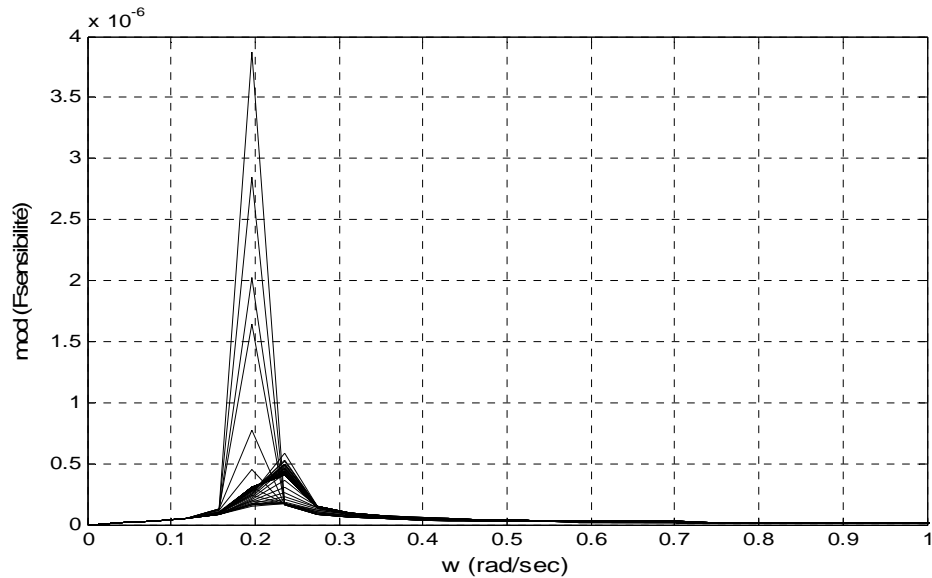


Figure 12. Vue sur le plan de la fréquence : module de fonction de sensibilité en fonction de w (rad/sec).

En vue de garantir une bonne performance de la commande des convertisseurs d'électronique de puissance à cause de la forte variabilité de la source mécanique (la houle), nous cherchons à définir une fonction de sensibilité telle qu'enveloppe tous les autres. Si sur cette nouvelle fonction de sensibilité nous sommes capables de garantir une bonne performance, donc nous sommes capables de la garantir aussi quel que soit la fréquence de pulsation de la houle.



7. Conclusion et perspectives

Nous avons traité la mécanique de fluides et énoncé différents hypothèses associées à la simplification et linéarisation des équations. Nous avons pu modéliser et trouver un modèle mécanique général du mouvement d'un houlo-générateur.

Nous avons pu simplifier l'équation mécanique générale du houlo-générateur en considérant que le mouvement vertical (vers l'axe z - pilonnement). Cette considération a été faite en supposant l'action du système d'ancrage idéale.

Nous avons traité la variabilité de la fonction de sensibilité de la réponse de vitesse en fonction des différentes fréquences de pulsation de la source mécanique (la houle). Nous avons par la suite énoncé la proposition d'une fonction de sensibilité telle qui enveloppe toutes les autres afin de garantir la performance des convertisseurs d'électronique de puissance quel que soit la fréquence de la houle incidente.

Afin de donner un traitement complet à la première partie concernant la modélisation mécanique du houlo-générateur, il faudrait traiter la source mécanique, c'est-à-dire, la houle. La houle est une source stochastique et décrit par une densité spectrale de puissance par chaque état de mer donné.

Il serait également important du point de vue implémentation et validation du modèle mécanique, trouver une méthode de résolution de l'équation mécanique dans le domaine temporel en approximant l'intégrale de convolution lié au spectre du terme de radiation du houlo-générateur.



8. Références

- [1] www.legrenelle-environnement.fr
- [2] *Total Primary Energy Supply – From Sunlight*. [Resource électronique] : [ref. 2010]. Disponible Sur : www.ez2c.de/ml/solar_land_area
- [3] International Energy Agency. *Renewable Information*. 2010.
- [4] Ifremer. *Les énergies renouvelables marines – Synthèse d'une étude prospective á l'horizon 2030*. 2008.
- [5] <http://taperedchannelwaveenergy.weebly.com/tapchan-model.html>
- [6] http://waveenergy.no/technology_innovation
- [7] www.wavedragon.net
- [8] www.wavegen.co.uk
- [9] www.oceanlinx.com
- [10] www.pelamiswave.com
- [11] www.ec-nantes.fr/version-francaise/developpement-durable/
- [12] SHAMES, Irving H. *Mechanics of Fluids*. McGraw-Hill Book Company. 1962.
- [13] GRATTON, J. *Introducción a la mecánica de fluidos*. Cap. 9: Ondas superficiales de gravedad. 2003.
- [14] NILS, Salvensen *et al.* *Ships Motions and Sea Loads*. The society of Naval Architects and Marine Engineers. New York. 1970.
- [15] W.E Cummins. *The impulse response function and ship motions*. Schiffstechnik Forschungsinstitut. 1962.
- [16] User Manual. Disponible sur : <http://www.wamit.com/manual.htm>
- [17] www.wamit.com



Annexe A

En considérant la houle de nature sinusoïdale (A.1), le potentiel scalaire du champ de vitesse pour la houle incident est calculé à partir de l'équation de continuité (A.2) :

$$z(x, t) = f(x)e^{j\omega t} \quad (\text{A.1})$$

$$\nabla^2 \phi_I = \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0 \quad (\text{Equation de continuité}) \quad (\text{A.2})$$

L'équation précédente se résout avec les conditions aux limites suivantes :

- *Dans le fond marin* : La vitesse normale d'une particule du fluide dans le fond marin ($z = -h$) est nulle. h est la distance entre la surface libre de la mer et le fond marin.

$$V_z = \left. \frac{\partial \phi_I}{\partial t} \right|_{z=-h} = 0 \quad (\text{A.3})$$

- *Pression sur la surface libre de la mer* : Les variations de la pression sur la surface libre de la mer par rapport au temps sont égales à zéro.

$$\left. \frac{dP}{dt} \right|_{z=0} = 0 \quad (\text{A.4})$$

A partir de l'équation du champ de pression sur un différentiel de fluide (A.5) :

$$P = -\rho \left(\frac{\partial \phi_I}{\partial t} + gz \right) \quad (\text{A.5})$$

(A.4) devient :

$$\frac{dP}{dt} = -\rho \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \phi_I}{\partial t} + gz \right) = -\rho \left[\left(\frac{\partial^2 \phi_I}{\partial t^2} + \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial \phi_I}{\partial t} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial \phi_I}{\partial t} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial \phi_I}{\partial t} \frac{dz}{dt} \right) + g \left(\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial z}{\partial x} \frac{dx}{dt} \right) \right] \quad (\text{A.6})$$

$$\text{Avec } V_x = \frac{dx}{dt} = \frac{\partial \phi_I}{\partial x}, \quad V_y = \frac{dy}{dt} = \frac{\partial \phi_I}{\partial y} \quad \text{et} \quad V_z = \frac{dz}{dt} = \frac{\partial \phi_I}{\partial z} :$$



$$\frac{dP}{dt} = -\rho \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \phi_I}{\partial t} + gz \right) = -\rho \left[\left(\frac{\partial^2 \phi_I}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 \phi_I}{\partial x^2} \frac{\partial \phi_I}{\partial t} + \frac{\partial^2 \phi_I}{\partial y^2} \frac{\partial \phi_I}{\partial t} + \frac{\partial^2 \phi_I}{\partial z^2} \frac{\partial \phi_I}{\partial t} \right) + g \left(\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial z}{\partial x} \frac{dx}{dt} \right) \right] \quad (\text{A.7})$$

Si la hauteur de la houle est négligeable par rapport à la profondeur $\frac{H}{h} \ll 1$ et si les variations d'élévation de la surface de la mer sont petites vers la direction de propagation $\frac{\partial z}{\partial x} \approx 0$, la vitesse normale au fond marin peut être approximée par sa dérivée partielle par rapport au temps $V_z \approx \frac{\partial z}{\partial t}$. Donc, (A.7) devient :

$$\frac{dP}{dt} = -\rho \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \phi_I}{\partial t} + gz \right) = -\rho \left[\left(\frac{\partial^2 \phi_I}{\partial t^2} + \frac{\partial \phi_I}{\partial t} (\nabla^2 \phi_I) \right) + g \left(\frac{\partial z}{\partial t} \right) \right] \quad (\text{A.8})$$

$$\left. \frac{dP}{dt} \right|_{z=0} = -\rho \left[\left(\frac{\partial^2 \phi_I}{\partial t^2} + \frac{\partial \phi_I}{\partial t} (\nabla^2 \phi_I) \right) + g \left(\frac{\partial z}{\partial t} \right) \right] = 0 \quad (\text{A.9})$$

$$\left. \frac{\partial^2 \phi_I}{\partial t^2} + g \frac{\partial \phi_I}{\partial z} \right|_{z=0} = 0 \quad (\text{A.10})$$

Pour la houle incidente, le potentiel scalaire de la houle incident doit être de la forme :

$$\phi_I = f(z) \cos(\omega t - kx) \quad (\text{A.11})$$

k est le nombre d'onde définit comme le nombre d'oscillations qu'effectue une onde par unité de longueur ($2\pi/\lambda$), avec λ la longueur d'onde. ω est la fréquence de pulsation de la houle et z son élévation de la mer.

En substituant (A.11) en (A.10) :

$$\frac{\partial^2 f(z)}{\partial t^2} - k^2 f(z) = 0 \quad (\text{A.12})$$

La solution de la fonction $f(z)$ est de la forme (A.13). C et D sont les constants d'intégration:

$$f(z) = (Ce^{kz} + De^{-kz}) \quad (\text{A.13})$$

Le potentiel scalaire devient :



$$\phi_I = (Ce^{kz} + De^{-kz})\cos(\omega t - kx) \quad (\text{A.14})$$

En appliquant les conditions aux limites :

- De (A.3) :

$$\phi_I = \phi_0 \cos(\omega t - kx) \quad (\text{A.15})$$

Avec,

$$\phi_0 = 2Ce^{-kh} \cosh k[(h+z)] \quad (\text{A.16})$$

- De (A.4) :

$$\omega^2 = gk \tanh(kh) \quad (\text{A.17}) \text{ (Relation de dispersions des ondes de gravité) [13]}$$

En eaux profondes, la longueur d'onde devient négligeable par rapport à la profondeur de la mer $h \gg \lambda$, pourtant, le terme $\tanh(kh) \approx 1$. L'équation (A.17) devient (A.18) :

$$\omega^2 = gk \quad (\text{A.18})$$

L'élévation de la surface de la mer due à la houle incident est de la forme (A.19), avec A son amplitude.

$$z = A \sin(\omega t - kx) \quad (\text{A.19})$$

En intégrant V_z dans le temps, l'expression de l'élévation de la surface de la mer est :

$$z = \int V_z dt = \int \frac{\partial \phi}{\partial z} dt = \int 2kCe^{-kh} \sinh(kh) \cos(\omega t - kx) dt \quad (\text{A.20})$$

Alors, A est égale à :

$$A = \frac{2kCe^{-kh}}{\omega} \sinh(kh) \quad (\text{A.21})$$

Finalement, le potentiel scalaire de la houle incidente est [13], [17] :

$$\phi_I = Aw \frac{\cosh[k(h+z)]}{k \sinh(kh)} \cos(\omega t - kx) \quad (\text{A.22})$$



Annexe B

Coefficient de récupération hydrostatique $C_{33} = 21354 \text{ kN/sec}^2$.

w (rad/sec)	m_{r33} (p.u)	R_{r33} (p.u)	F_{ex3} (p.u)
0.000	2.39824700	0.00000000	0.00000000
0.039	2.43171100	0.02974439	3.11200400
0.078	2.47391600	0.11335640	3.03761600
0.117	2.48778000	0.23477480	2.91429500
0.156	2.45710400	0.37089740	2.74739600
0.195	2.38051700	0.49787370	2.54656500
0.234	2.26785900	0.59701240	2.32409000
0.273	2.13436500	0.65834120	2.09173300
0.313	1.99619500	0.67996060	1.86023200
0.352	1.86599900	0.66618020	1.63652900
0.391	1.75316700	0.62467520	1.42656600
0.430	1.66188200	0.56388690	1.23210700
0.469	1.59398800	0.49229640	1.05534600
0.508	1.54844100	0.41710310	0.89680510
0.547	1.52259800	0.34415510	0.75677440
0.586	1.51268600	0.27666600	0.63334200
0.625	1.51506300	0.21723410	0.52610030
0.664	1.52604000	0.16724840	0.43456560
0.703	1.54261200	0.12623000	0.35653680
0.742	1.56234800	0.09386353	0.29129290
0.781	1.58397900	0.06933147	0.23796870
0.820	1.61187800	0.05246923	0.19732790
0.859	1.58629100	0.02769161	0.13622790
0.898	1.62456100	0.02238006	0.11737420
0.938	1.64207500	0.01573500	0.09433345
0.977	1.65621300	0.01072132	0.07465130
1.016	1.66788900	0.00723180	0.05884015
1.055	1.67806800	0.00475613	0.04568844
1.094	1.68663300	0.00308977	0.03505994
1.133	1.69368100	0.00197918	0.02600997
1.172	1.69532400	-0.00035099	0.00319033
1.211	1.70678700	0.00080808	0.01960706

w (rad/sec)	$m_{r_{33}}$ (p.u)	$R_{r_{33}}$ (p.u)	F_{ex3} (p.u)
1.250	1.71126500	0.00049778	0.01410588
1.289	1.71530800	0.00030350	0.01060498
1.328	1.71898100	0.00018078	0.00798782
1.367	1.72227300	0.00010615	0.00601956
1.406	1.72508600	0.00006458	0.00465556
1.445	1.72764900	0.00005098	0.00397688
1.484	1.72984700	0.00000183	0.00130675
1.523	1.73202500	0.00000336	0.00140429
1.563	1.73385100	0.00000126	0.00105661
1.602	1.73558400	-0.00000004	0.00073917
1.641	1.73703500	-0.00000050	0.00050623
1.680	1.73852700	-0.00000037	0.00026335
1.719	1.73975900	-0.00000474	0.00075567
1.758	1.74092400	-0.00000111	0.00027591
1.797	1.74196800	-0.00000083	0.00020138
1.836	1.74296500	-0.00000085	0.00018253
1.875	1.74392200	-0.00000111	0.00024404
1.914	1.74476100	-0.00000359	0.00089210
1.953	1.74548200	0.00000183	0.00035461
1.992	1.74620800	0.00000053	0.00008605
2.031	1.74687100	-0.00000017	0.00003093
2.070	1.74745300	-0.00000095	0.00017128
2.109	1.74801100	-0.00000448	0.00095352
2.148	1.74854200	0.00000190	0.00034293
2.188	1.74899700	0.00000046	0.00008040
2.227	1.74944800	-0.00000044	0.00008319
2.266	1.74986800	-0.00000230	0.00040594
2.305	1.75023900	0.00000514	0.00129881
2.344	1.75056200	0.00000128	0.00022783
2.383	1.75087600	-0.00000004	0.00000727
2.422	1.75114700	-0.00000172	0.00028884
2.461	1.75145500	0.00000208	0.00162435
2.500	1.75166600	0.00000179	0.00030582