



PROJET DE FIN D'ÉTUDE
POUR LE MASTER FLUID MECHANICS

École polytechnique
Sorbonne Universités

Algues biomimétiques et interaction houle-structure

OPTIMISATION D'UNE STRUCTURE ÉLASTIQUE BIOINSPIRÉE, POUR LA
RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE ET LA PROTECTION DES LITTORAUX

présenté par
dirigé par

BAPTISTE LAFOUX
BENJAMIN THIRIA et RAMIRO GODOY-DIANA

soutenu le 11 septembre 2019 à Palaiseau (LadHyx)

Résumé

L'étude des dispositifs de récupération d'énergie houlomotrice (énergie des vagues) connaît un intérêt croissant : ces derniers représentent en effet un potentiel important en terme de production d'énergie renouvelable, mais aussi de protection des littoraux, puisqu'ils atténuent les vagues, cause majeure d'érosion. Par ailleurs, les algues constituent également une protection à l'efficacité reconnue contre les vagues en zone côtière. Sur la base de ces constats, nous imaginons un dispositif biomimétique inspiré du comportement des algues : des structures immergées pour la récupération d'énergie et la protection des littoraux.

Dans ce rapport, nous nous intéressons à l'étude d'un champ de cylindres flexibles, fixés au fond de l'eau, puis soumis à des ondes de surface, en vue de développer un système capable d'atténuer les vagues et de récolter leur énergie en se déformant. Les résultats présentés se basent sur des expériences réalisées dans une cuve à vagues de petite échelle : la disposition spatiale des cylindres, ou poteaux, est en particulier analysée dans l'optique d'établir une répartition optimale. Une campagne expérimentale paramétrique est menée pour comprendre le rôle de l'espacement entre poteaux sur la répartition de l'énergie au sein du système et permet d'obtenir l'organisation spatiale la plus efficace pour un ensemble modèle de 9 poteaux.

Mots-clés *atténuation des vagues, élasticité, énergie houlomotrice, biomimétique*

Résumé

The study of wave energy harvesting devices is of increasing interest : they represent indeed a significant potential in terms of renewable energy production, but also for protection of the coastlines, since they mitigate waves, a major cause of erosion. In addition, algae are also a recongnized protection against waves in the coastal zone. On the basis of these observations, we imagine a biomimetic device inspired by the behavior of algae : a submerged structures for energy recovery and coastal protection.

In this report, we study a field of flexible cylinders, fixed on the seabed and subjected to surface waves. Our goalwith is to develop a system able to attenuate the waves and harvest their energy by deforming. The results presented are based on experiments carried out in a small-scale wave tank : the spatial arrangement of the cylinders, or beam, is analyzed in order to establish an optimal distribution. A parametric experimental campaign is conducted to understand the role of beam spacing on the energy distribution within the system and to obtain the most efficient spatial organization for a model set of 9 beams.

Keywords *wave attenuation, elasticity, wave energy, biomimetics*

Remerciements

Je remercie en premier lieu et chaleureusement Ramiro et Benjamin de m'avoir accueilli au sein du groupe BIOMIM : pour la liberté que vous m'avez assurée et la confiance dont vous avez fait preuve à mon égard en me donnant un sujet et une expérience "à moi tout seul", merci !

Merci encore au reste des BIOMIM stagiaires et doctorants, pour la belle entente et la camaraderie qui a régné (et continuera de régner, j'en suis sûr) dans la salle de manip'/bureau la plus fun du couloir. Un merci particulier à Roméo, en qui j'ai trouvé un conseiller technique en découpe laser, une source d'information intarissable sur les films français bien mais pas top, et finalement un ami. Merci aussi à l'ancienne BIOMIM Clotilde, pour sa disponibilité et ses conseils forcément avisés : je suis heureux d'avoir pu apporter ma petite pierre à l'édifice que tu avais déjà si bien commencé.

À l'ensemble du PMMH, un immense merci pour votre hospitalité : aux doctorant.e.s Lucas, Emmanuel, Ambre, Armand, Matthias, Jean, PH, Manon, Gaspard, Benoît, Martina, Tao, merci pour la team CROUS, la pétanque, la découverte du monde de la recherche et surtout votre gentillesse. Nos routes se séparent un peu, mais le RER (quand il fonctionne) me permettra quand même d'être à l'heure aux Arènes le vendredi soir de temps à autres. À très bientôt !

Merci à Benoît Semin pour son savoir-faire en terme de moteurs et de transmissions mécaniques en tout genre, et pour son aide bienveillante pour la construction de mon dispositif expérimental. Merci à Antonin Eddi pour des discussions fructueuses à propos de la méthode SSI.

Pour m'avoir gardé au chaud une place dans la grande aventure WIND my ROOF malgré une implication toute relative pendant ce semestre, merci à mes amis Yanis et Antoine. Je remercie aussi de tout coeur mes parents pour leur soutien précieux et mes amis pour leur présence à mes côtés.

Séverine, merci pour ta patience et ton amour attentionné ; merci de partager ma vie dans tous ces moments importants.

Table des matières

1	Introduction	9
1.1	L'énergie houlomotrice : une ressource importante mais encore peu exploitée	9
1.2	Un avantage à approfondir : la protection des espaces littoraux	11
1.3	Vers des dispositifs biomimétiques de récupération d'énergie	13
2	Matériel et méthodes	15
2.1	Matériel expérimental	15
2.1.1	Cuve à vagues et batteur	15
2.1.2	Piliers flexibles	22
2.2	Méthodes de mesure	26
2.2.1	Mesure de déformation d'une surface libre	26
2.2.2	Mesure des coefficients de réflexion et transmission	29
3	Résultats expérimentaux	32
3.1	Étude préliminaire : dissipation naturelle de la cuve et énergie d'un poteau seul \bar{E} .	32
3.2	Étude paramétrique d'une structure modèle 3×3	34
3.3	Onde induite ré-émise par les poteaux	41
4	Conclusions et perspectives	44
4.1	Organisation optimale des poteaux	44
4.2	Perspectives expérimentales et limites de l'étude	45
4.3	Utilisation de matériaux piézo-électriques	46
5	Annexes	47
5.1	Énergie élastique d'un poteau	47
5.2	Plans des bases de poteaux	49

Table des figures

1	Ressource globale en densité de puissance houlomotrice à l'échelle internationale. Les flèches représentent la direction privilégiée des vagues. [Thorbjornsson et al., 2012]	9
2	Projection du LCOE (Coût Actualisé de l'Énergie, en €/kWh) pour différentes énergies marines. Le LCOE prend en compte les coûts d'investissement et d'opération et de maintenance sur la durée de vie de l'équipement. Estimations réalisées par le groupement Ocean Energy Systems. [OES, 2018]	10
3	Principaux types d'absorbeurs houlomoteurs à corps oscillant. De gauche à droite : absorbeur ponctuel, flotteur, absorbeur <i>flap-type</i> . [Day et al., 2015]	10
4	Compilation de mesures, d'estimations globales et de projection probables pour le niveau moyen des mers (scénarii RCP2.6 (bleu) et RCP8.5 (rouge) - Representative Concentration Pathway, trajectoire de forçage radiatif). [GIEC, 2013]	11
5	Haut - Hauteur moyenne des vagues en présence d'une "ferme à vague" : l'effet significatif de cette dernière sur l'amplitude de la houle est visible sur près de 2 kilomètres. Bas - Surface de plage érodée sur une période de 2 mois avec plusieurs tempêtes, simulations numériques. y est la coordonnée le long de la côte (bleu : sans ferme houlomotrice, vert : avec). [Abanades et al., 2018]	12
6	Convertisseurs houlomoteurs biomimétiques (bas : d. bioWAVE, e. Eel Energy, f. BioStream) et leur inspiration respective (haut : a. Varech, b. Anguille ruban, c. Thons).	13
7	Schéma et photographie du dispositif électronique de commande du batteur à vagues	16
8	Photographie et dimensions de la cuve à vagues et du système d'acquisition vidéo. La zone d'intérêt filmée par la caméra mesure environ 1m20 (voir FIGURE 9); la hauteur à laquelle cette dernière est placée est donc suffisante pour négliger d'éventuelles distorsions au bord de la zone d'acquisition.	17
9	Schéma cinématique de fonctionnement du batteur à vagues et dimensions de la cuve d'essai (longueurs en centimètres).	18
10	Mesure de la relation de dispersion pour notre dispositif expérimental, pour une hauteur d'eau $h = 8.5\text{cm}$. Les motifs rouges représentent les mesures, les pointillés les valeurs théoriques des modèles en eau profonde ou intermédiaire.	19
11	Validation de la linéarité de la fréquence temporelle des vagues en fonction de la consigne en tension appliquée au moteur électrique du batteur.	19
12	Exemple de mesure de surface libre (voir 2.2 pour les détails). Les mesures sont moyennées dans la direction y transversale au mouvement et la dissipation naturelle est corrigée. Haut : approximation de la surface libre du liquide par une sinusoïde de la forme $A \cos(2\pi \frac{x}{\lambda} + \phi)$ ($r^2=0.982$); bas : transformée de Fourier spatiale du signal précédent (mesure), présentant une longueur d'onde fondamentale clairement isolée.	20
13	Expérience de réflexion dans la cuve à vide, sans plage ($\alpha = +\infty$, en bleu) et avec une plage de 12.6° ($\alpha = 0.22$, en rouge).	21
14	Coefficient de réflexion en amplitude K_r en fonction de l'inverse de l'angle d'inclinaison α (en rad) entre la plage et l'horizontale.	22
15	Détermination expérimentale de la fréquence de résonance des poteaux pour 2 rigidités différentes. A correspond à l'amplitude des oscillations mesurées pour un poteau seul placé dans la cuve, A^* est l'amplitude maximale mesurée.	23
16	Illustration des méthodes de liaison des poteaux avec le fond de la cuve. gauche : avec une ventouse, droite : avec une base en ABS imprimée en 3D.	24

17	gauche : Vue de la fixation inférieure du poteau avec une pièce Lego circulaire, droite : Installation complète des poteaux équipés dans la cuve, pour une disposition 4×2	24
18	Exemple de tracking sur 1s du mouvement des poteaux disposés en 3×3 ($h = 10.5\text{cm}$, $f = 2.9\text{Hz}$) : suivi de la position en x (sens de déplacement des vagues). Les couleurs de l'image supérieure correspondent à celles du graphique.	25
19	Configuration de référence et déformée permettant la visualisation d'une onde de surface. (gauche : motif ponctuel aléatoire; droite : quadrillage régulier). [Wildeman, 2018]	26
20	Montage expérimental pour la mesure de déformation de surface libre	26
21	Reconstruction 3D des ondes de surface dans la cuve à vide ($h = 8.4\text{cm}$, $f = 3.2\text{Hz}$)	28
22	Visualisation 2D des ondes de surface (mm) dans la cuve avec 2 poteaux alignés horizontalement à une distance longitudinale $l = 6.4\text{cm}$ ($h = 11\text{cm}$, $f = 4.3\text{Hz}$). Taille de la fenêtre de visualisation : $79 \times 22\text{cm}$	29
23	Haut : modèle théorique simplifié du comportement de l'onde de surface et méthode de démodulation de l'onde réfléchie pour la calcul du coefficient de réflexion K_r (voir détails ci-dessus). Bas : application de cette méthode de calcul à un cas réel de mesure (expérience à $h = 10.2\text{cm}$ et $f = 4.02\text{Hz}$ pour une matrice régulière de poteaux en 3×3 , $l = 7.2\text{cm}$, $d = 4.8\text{cm}$).	30
24	Description des zones de mesure de K_r et K_t et des variations dx et dy faites sur ces dernières pour valider l'invariance de la méthode de mesure (voir FIGURE 25).	31
25	Variation des coefficients K_r et K_t pour des modification Δx et Δy de la taille des fenêtres de mesure (voir illustration en FIGURE 24). Expérience menée à $h = 10.2\text{cm}$ et $f = 4.02\text{Hz}$ pour une matrice régulière de poteaux en 3×3 ($l = 7.2\text{cm}$, $d = 4.8\text{cm}$). 31	
26	Dissipation naturelle dans la cuve à vide en fonction de la distance longitudinale x , pour une hauteur d'eau au repos $h = 11\text{cm}$	33
27	En bleu : Dissipation naturelle dans la cuve à vide pour $h = 11\text{cm}$ et $f = 4.02\text{Hz}$. En rouge : Énergie (unité arbitraire) pour un poteau seul placé à différents x	34
28	Paramètres expérimentaux et organisations géométriques pour l'étude paramétrique	35
29	Exemple de relevé (en mm) réalisé avec la méthode SSI pour une matrice régulière 3×3 ($l = 7.2\text{cm}$, $d = 4.8\text{cm}$, $h = 11\text{cm}$, $f = 4.02\text{Hz}$). La zone bleu foncé représente l'espace de "végétation". Taille de la fenêtre de visualisation : $79 \times 22\text{cm}$	35
30	Moyenne temporelle pour une acquisition vidéo de 4s ($l = 7.2\text{cm}$, $d = 4.8\text{cm}$, $h = 11\text{cm}$, $f = 4.02\text{Hz}$)	36
31	Résultats expérimentaux en fonction de l/λ ($\lambda = 11.9\text{cm}$) pour un structure de poteaux $E = 0.88\text{MPa}$ disposés en 3×3 ($d = 4.8\text{cm}$, $h = 11\text{cm}$, $f = 3.82\text{Hz}$). En bleu : coefficients de réflexion et de transmission. En rouge : Énergie élastique moyenne des 9 poteaux, normalisée par l'énergie d'un poteau seul \bar{E} qui serait placé au niveau de la colonne centrale. (■) pour une structure régulière, (◆) pour une structure en quinconce.	37
32	Résultats expérimentaux en fonction de l/λ ($\lambda = 11.9\text{cm}$) pour un structure de poteaux $E = 0.88\text{MPa}$ disposés en 3×3 ($h = 11\text{cm}$, $f = 3.82\text{Hz}$). En noir : somme des coefficients de réflexion et de transmission. En rouge : Énergie élastique moyenne des 9 poteaux, normalisée par l'énergie d'un poteau seul \bar{E} qui serait placé au niveau de la colonne centrale. (■) pour une structure régulière, (◆) pour une structure en quinconce.	38

33	Énergie moyenne normalisée E_{el}/\bar{E} de chaque colonne en fonction de l/λ , pour un structure de poteaux $E = 0.88\text{MPa}$ disposés en 3×3 ($h = 11\text{cm}$, $f = 3.82\text{Hz}$). 1 correspond à la colonne la plus en amont, 3 à la plus en aval. (■) pour une structure régulière, (◆) pour une structure en quinconce.	39
34	Résultats expérimentaux en fonction de d/λ ($\lambda = 11.9\text{cm}$) pour un structure de poteaux $E = 0.88\text{MPa}$ disposés en 3×3 (matrice régulière, $l = 5.6\text{cm}$, $h = 11\text{cm}$, $f = 3.82\text{Hz}$). En bleu : coefficients de réflexion et de transmission. En rouge : énergie élastique moyenne des 9 poteaux, normalisée par l'énergie d'un poteau seul \bar{E} qui serait placé au niveau de la colonne centrale.	40
35	Résultats expérimentaux en fonction de d/λ ($\lambda = 11.9\text{cm}$) pour un structure de poteaux $E = 0.88\text{MPa}$ disposés en 3×3 (matrice régulière, $h = 11\text{cm}$, $f = 3.82\text{Hz}$). En noir : somme des coefficients de réflexion et de transmission. En rouge : énergie élastique moyenne des 9 poteaux, normalisée par l'énergie d'un poteau seul \bar{E} qui serait placé au niveau de la colonne centrale.	41
36	Haut : carte d'élévation de la surface libre résultant de l'algorithme SSI, pour un poteau seul ($E = 0.88\text{MPa}$) soumis à des vagues de fréquence $f = 4.02\text{Hz}$ ($h = 11\text{cm}$) Milieu : Transformée de Fourier 2D inversée, après retrait des vecteurs d'onde dans la direction longitudinale x Bas : Visualisation identique à celle du milieu, en nuance de gris pour faciliter la lecture de l'image. Le point rouge localise le poteau. Les lignes de couleurs correspondent aux courbes tracées en FIGURE 37 (colorbar en mm, taille de la fenêtre de visualisation : $79 \times 22\text{cm}$)	42
37	Comparaison des amplitudes de vagues en fonction de la direction longitudinale x entre la mesure initiale via l'algorithme SSI et la mesure post-traitée par FFT en 2D.	43
38	Haut : carte d'élévation de la surface libre résultant de l'algorithme SSI, pour 2 et 3 poteaux ($E = 0.88\text{MPa}$) soumis à des vagues de fréquence $f = 4.02\text{Hz}$ ($h = 11\text{cm}$), séparés d'une longueur $l = 5.6\text{cm}$. Milieu : Transformée de Fourier 2D inversée, après retrait des vecteurs d'onde dans la direction longitudinale x . Bas : Visualisation identique à celle du milieu, en nuance de gris pour faciliter la lecture de l'image. Les points rouges localisent les poteaux (colorbar en mm, taille de la fenêtre de visualisation : $79 \times 22\text{cm}$)	43
39	Moyenne temporelle d'une acquisition vidéo de 4s pour une répartition de poteaux 5×4 avec une fréquence de vagues $f = 4.02\text{Hz}$. Zone d'acquisition : $79 \times 22\text{cm}$	45
40	Exemple de répartition aléatoire pour 9 poteaux	46
41	Gauche : lame piézo-électrique MFC Smart Material. Droite : Feuille piézo-électrique souple métallisée.	46
42	Test (peu fructueux) d'installation d'une feuille piézo-électrique métallisée NiCu sur un poteau flexible.	46
43	Modèle de poutre console étudié pour la modélisation des poteaux élastiques	47
44	Vues en coupe des deux parties indépendantes des bases réalisées en impression 3D. Les solides sont des révolutions de ces plans autour de l'axe V représenté.	49

*La vague en poudre ose jaillir des rocs !
Envolez-vous, pages tout éblouies !
Rompez, vagues ! Rompez d'eaux réjouies
Ce toit tranquille où picoraient des focs !*

Paul Valéry, *Le Cimetière Marin* (1917)

1. Introduction

L'objectif fixé par le GIEC d'une limitation de la hausse globale des températures d'ici 2050 à 2°C fait aujourd'hui consensus parmi les décideurs et décideuses politiques et économiques : pour l'atteindre, 2/3 des ressources fossiles présentes sur notre planète devront rester inexploitées [Mcglade and Ekins, 2014], au profit d'une production plus durable d'énergie. Même si cet objectif est rempli, le niveau des mers continuera de monter (entre 0.7 et 1 mètre d'ici 2100), mettant en péril la pérennité de nombreuses populations humaines, écosystèmes et activités économiques.

Formidable source d'énergie et de ressources primaires, l'océan apparaît donc à la fois comme une menace et une opportunité : la capacité de nos sociétés à l'exploiter efficacement et raisonnablement tout en protégeant les zones côtières constitue un enjeu majeur de la transition écologique.

Ces défis fondent les motivations de ce projet : nous tenterons en particulier d'approfondir la compréhension scientifique des interactions entre vagues et structures immergées en zone côtière. La finalité sera de concevoir un dispositif innovant, permettant à la fois la récupération d'énergie houlomotrice (énergie des vagues) et la prévention de l'érosion des littoraux.

1.1 L'énergie houlomotrice : une ressource importante mais encore peu exploitée

Gunn and Stock-Williams [2012] estiment à 2.11 ± 0.05 TW la puissance houlomotrice disponible à l'échelle mondiale, dont 4.6% seraient facilement extractibles (voir FIGURE 1). Sur un an, ce chiffre correspond à 11% du total d'énergie primaire consommé sur Terre [BP, 2018]. L'énergie des vagues pourrait donc constituer un apport majeur à la production renouvelable d'électricité au niveau mondiale.

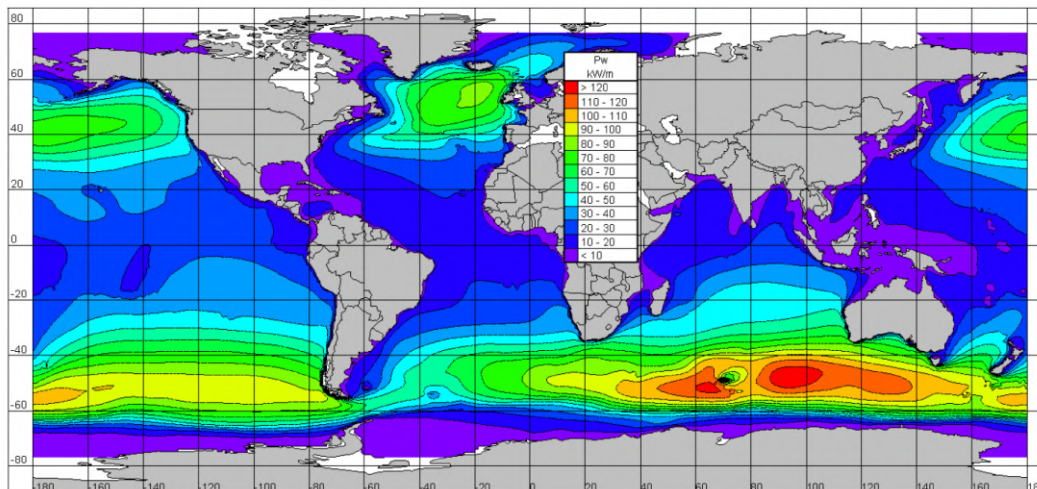


FIGURE 1 – Ressource globale en densité de puissance houlomotrice à l'échelle internationale. Les flèches représentent la direction privilégiée des vagues. [Thorbjornsson et al., 2012]

Pourtant, alors que de nombreux développements scientifiques et investissements industriels ont été réalisés ces 20 dernières années dans le domaine de l'extraction d'énergie houlomotrice,

il existe encore très peu de solutions ayant atteint une réelle maturité industrielle, et aucune n'est commercialisée à grande échelle pour le moment. L'intérêt croissant des investisseurs et l'augmentation des puissances installées devraient cependant permettre de diminuer le coût actualisé de production de l'énergie (LCOE) à des niveaux comparables à ceux des autres énergies renouvelables (1.50€/kWh) afin de rendre le secteur compétitif à l'horizon 2050, comme l'illustre la FIGURE 2.

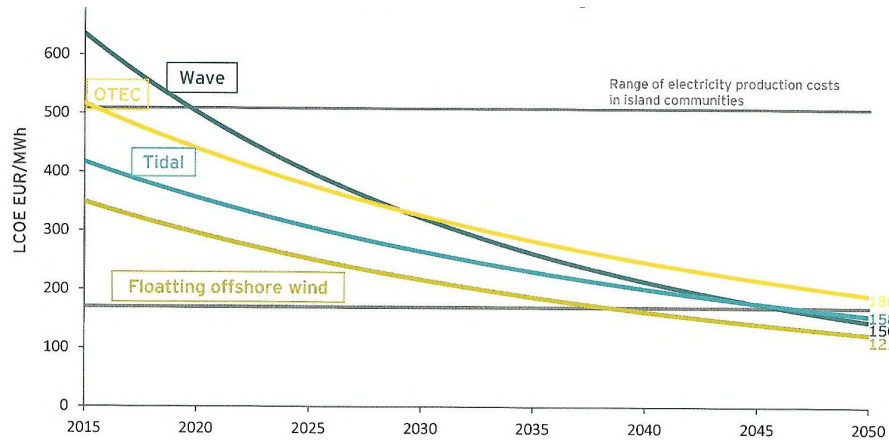


FIGURE 2 – Projection du LCOE (Coût Actualisé de l'Énergie, en €/kWh) pour différentes énergies marines. Le LCOE prend en compte les coûts d'investissement et d'opération et de maintenance sur la durée de vie de l'équipement. Estimations réalisées par le groupement Ocean Energy Systems. [OES, 2018]

De nombreux designs de convertisseurs différents existent, dont l'essentiel est synthétisé dans les reviews de Day et al. [2015] et Falnes [2007] : les principaux concepts de récupérateurs à corps oscillant sont illustrés par le schéma en FIGURE 3. Par ailleurs, de récents progrès concernant les matériaux piézo-électriques offrent des opportunités nouvelles de conversion de la déformation d'un solide en énergie électrique exploitable [Jbaily and Yeung, 2015].

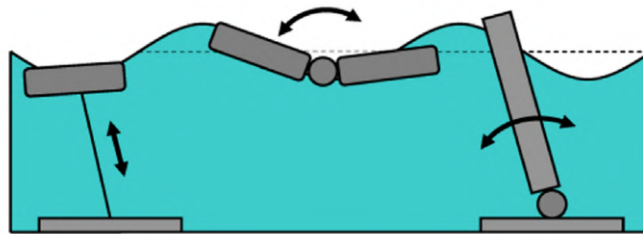


FIGURE 3 – Principaux types d'absorbeurs houlomotriciens à corps oscillant. De gauche à droite : absorbeur ponctuel, flotteur, absorbeur *flap-type*. [Day et al., 2015]

L'énergie houlomotrice est par essence diffuse (faible densité volumique) mais sa disponibilité importante en fait une source particulièrement intéressante : par exemple, il est estimé que l'énergie électrique d'origine houlomotrice disponible en Grande-Bretagne est de l'ordre de 50 TWh par an,

soit l'équivalent de la production d'environ 5 réacteurs nucléaires, et de 40 TWh par an en France. En revanche, de nombreuses contraintes et obstacles constituent encore des verrous technologiques à la généralisation de cette méthode de production d'énergie.

- les vagues sont une sources d'énergie constante mais pourtant difficilement prédictible puisque elle sont par nature des ondes fortement polychromatiques et multidirectionnelles. Ainsi, pour assurer un rendement optimal, le Power Take Off doit être étudié afin de faire correspondre la fréquence propre du système avec celle des vagues caractéristiques du site d'installation.
- les conditions environnementales d'opération, souvent difficiles voire extrêmes, exigent une conception et des matériaux performants et coûteux, notamment pour lutter contre la corrosion et le fouling (encrassement par dépôts biologiques)
- la distance parfois importante entre le récupérateur d'énergie et la côte complique fortement l'ancrage du dispositif sur le fond, la maintenance régulière et le raccordement électrique.

Ainsi, la récupération d'énergie houlomotrice est une technologie en devenir mais encore relativement immature en comparaison de nombreuses autres sources d'énergie renouvelable. Pourtant, un avantage encore peu considéré des dispositifs houlomoteurs peut potentiellement jouer en leur faveur et participer à leur démocratisation : leur faculté de protection des espaces côtiers.

1.2 Un avantage à approfondir : la protection des espaces littoraux

La hausse des températures, ainsi que les phénomènes météorologiques extrêmes et l'augmentation du niveau des océans qui l'accompagnent contribuent à accroître l'érosion et le retrait des littoraux [FAO, 2016]. Dans le monde, 3.8 milliards de personnes résident à moins de 150 km du rivage d'après l'UICN (Union internationale pour la conservation de la nature) et 10% de la population à moins de 10 mètres au dessus du niveau de la mer. D'après le GIEC, le niveau moyen des mers devrait, selon les scénarii, augmenter d'ici 2100 de 0.7 à 1 mètre par rapport à l'ère pré-industrielle. ([GIEC, 2013], voir FIGURE 4)

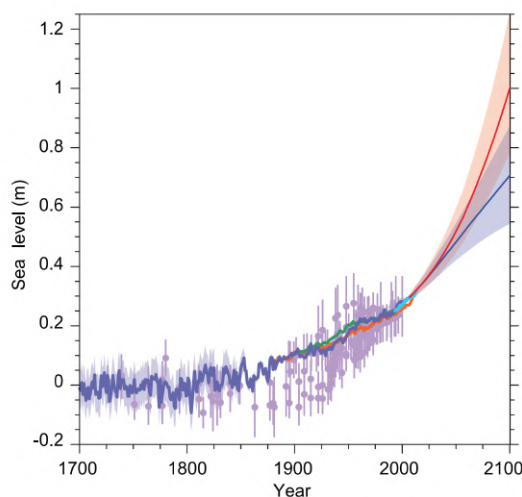


FIGURE 4 – Compilation de mesures, d'estimations globales et de projection probables pour le niveau moyen des mers (scénarii RCP2.6 (bleu) et RCP8.5 (rouge) - Representative Concentration Pathway, trajectoire de forçage radiatif). [GIEC, 2013]

Cela pose des problématiques de sécurité majeures, puisque ces régions sont toutes particulièrement exposées aux inondations graduelles et aux marées exceptionnelles et, pour certaines, aux tsunamis [Fitzgerald et al., 2008]. Ces zones littorales sont également l'environnement naturel de nombreuses espèces animales et végétales sensibles aux changements climatiques et à l'action anthropique. Finalement, elles sont essentielles pour de nombreuses activités humaines, telles que l'activité portuaire ou touristique, dont de nombreuses populations dépendent économiquement.

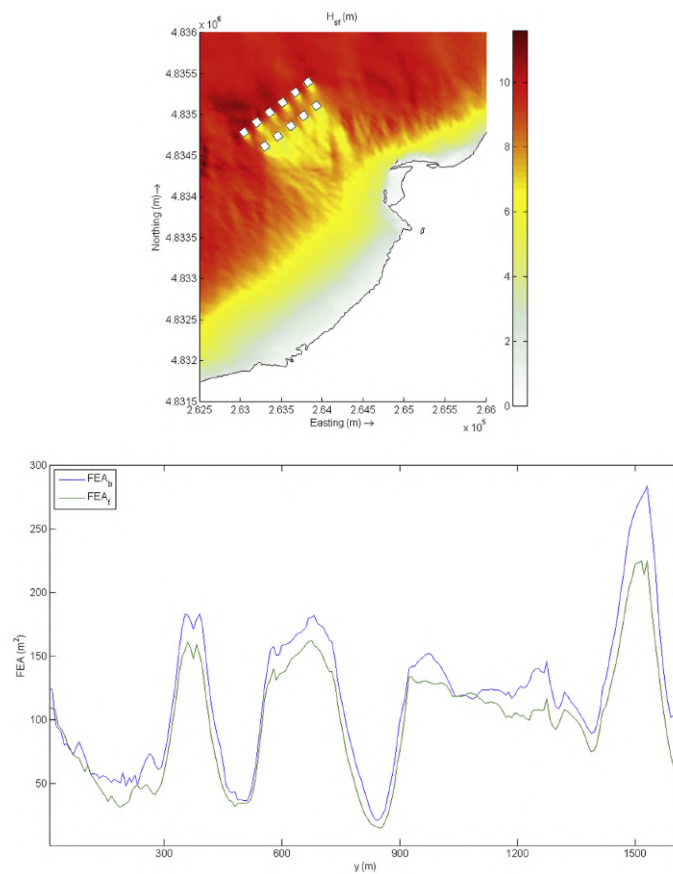


FIGURE 5 – Haut - Hauteur moyenne des vagues en présence d'une "ferme à vague" : l'effet significatif de cette dernière sur l'amplitude de la houle est visible sur près de 2 kilomètres. Bas - Surface de plage érodée sur une période de 2 mois avec plusieurs tempêtes, simulations numériques. y est la coordonnée le long de la côte (bleu : sans ferme houlomotrice, vert : avec). [Abanades et al., 2018]

Actuellement, les infrastructures visant à atténuer ou faire face à ces phénomènes d'érosion consistent quasi exclusivement en des digues de roches ; ces dernières se révèlent cependant souvent insuffisantes face à des événements climatiques extrêmes, en raison de leur faible hauteur : les construire plus hautes est inenvisageable pour des régions dont l'économie repose en bonne partie sur le fait de voir la mer ! À ce titre, des solutions différentes sont explorées afin de protéger les littoraux et se penchent entre autres sur le biomimétisme, en utilisant des plantes, ou même des dispositifs inspirés de ces dernières.

Ainsi, Fonseca and Cahalan [1992] ont étudié le rôle de quatre différents types d'algues sur l'atténuation de l'énergie des vagues en zone côtière. Il ont montré que leur présence peut réduire l'énergie de l'onde de 40% par mètre si la dimension de la plante est du même ordre de grandeur que la hauteur d'eau. Sánchez-González et al. [2011] ont quant à eux mis en évidence une décroissance exponentielle de l'amplitude des vagues en présence d'une prairie de *Posidonia oceanica* sur le fond d'un littoral, à l'aide d'une cuve à vagues. Un comportement équivalent pour les plantes terrestres et leur résilience face au vent peut être mis en évidence (voir citer Delangres 2008 pour une review).

De la même manière, il est intéressant de comprendre et de quantifier la propension des dispositifs de récupération d'énergie des vagues eux-mêmes à réduire l'érosion des côtes. En effet, ces derniers, en "prélevant" l'énergie de la houle, peuvent contribuer à la gestion de l'érosion côtière. De récents travaux concernant l'impact d'une "ferme" houlomotrice sur le littoral d'Asturias (Espagne) montrent ainsi qu'en choisissant judicieusement son positionnement, le dispositif de récupération d'énergie peut en théorie réduire la dégradation attendue jusqu'à 15% [Abanades et al., 2014]. Une autre étude du même auteur [Abanades et al., 2018] se concentre sur la juxtaposition de plusieurs fermes de convertisseurs d'énergie houlomotrice (WEC) placées à 2 kilomètres du rivage : elles permettent également de réduire significativement l'érosion du front de dune, comme le montre la FIGURE 5

Les dispositifs houlomoteurs peuvent ainsi jouer un rôle décisif dans la gestion de l'érosion côtière, en supplément de leur vocation première de production d'énergie renouvelable.

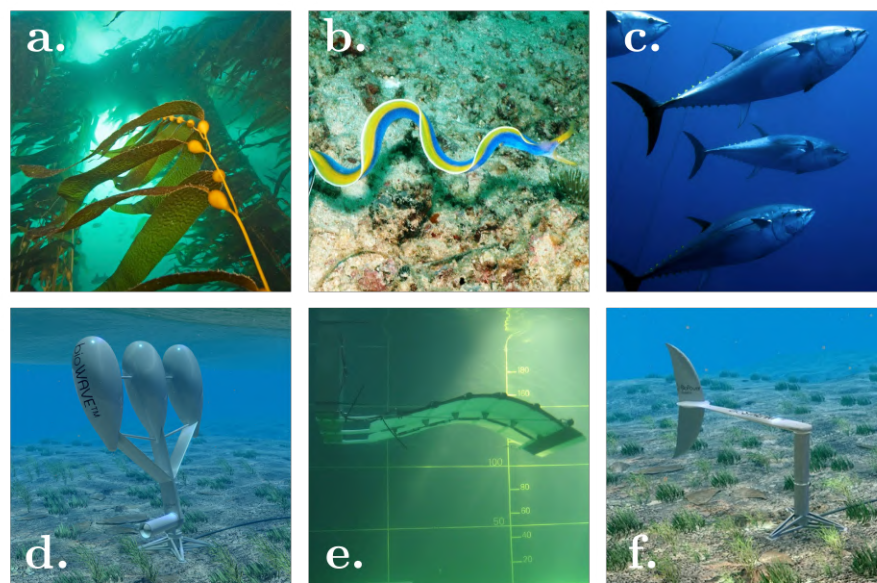


FIGURE 6 – Convertisseurs houlomoteurs biomimétiques (bas : d. bioWAVE, e. Eel Energy, f. BioStream) et leur inspiration respective (haut : a. Varech, b. Anguille ruban, c. Thons).

1.3 Vers des dispositifs biomimétiques de récupération d'énergie

Sachant ce double bénéfice et l'efficacité des plantes sous-marines en terme d'atténuation des vagues, il apparaît avantageux de réfléchir à une conception inspirée de la nature pour les

extracteurs houlomoteurs. De fait, plusieurs technologies ont déjà été développées dans cette optique (voir FIGURE 6), mais aucune d'entre elles ne s'attache à optimiser à la fois la dimension de récupération d'énergie et d'atténuation de l'érosion littorale.

Une structure biomimétique s'inspirant des algues à la fois pour leur efficacité en terme d'atténuation des vagues mais également dans une optique de récupération d'énergie serait donc une innovation : elle présenterait des intérêts aussi bien économiques que sociaux et environnementaux, puisqu'elle permettrait de produire de l'électricité de manière écologique tout en aidant à la gestion des littoraux en les protégeant de l'érosion.

Objectifs et plans

Nous concevons un dispositif immergé élastique capable à la fois de prélever de l'énergie à des vagues en se déformant et de réfléchir (ou ne pas transmettre) une partie de l'énergie de ces vagues.

En particulier, nous nous analysons expérimentalement les mécanismes impliqués dans l'interaction entre une "canopée" de cylindres flexibles et des vagues : nous examinons en particulier l'influence de l'organisation spatiale de ces derniers en terme d'énergie réfléchie, transmise et dissipée par le système. Cette problématique de recherche prend la suite de celle proposée par Nové-Josserand [2018] dans sa thèse, en étendant son étude portant sur des lames oscillantes (comportement majoritairement 1D) à des poteaux cylindrique. Le dispositif expérimental conçu est inspiré de ses travaux.

Dans un premier temps, le dispositif expérimental et les expériences-tests ayant servies à sa calibration sont décrites en détail. Les méthodes de mesure des grandeurs physiques (traitement d'image et calcul), notamment de la surface libre des vagues sont également expliquées. Nous exposons ensuite les résultats expérimentaux obtenus, en s'intéressant en particulier à un système simple de 3×3 cylindres, ou poteaux, pour lequel sont relevés des coefficient de transmission et de réflexion de l'énergie ainsi que l'énergie élastique dissipée. Une répartition géométrique optimale émerge et est rapportée par la suite, ainsi que quelques perspectives sur le sujet.

2. Matériel et méthodes

Cette section présente les équipements utilisés et systèmes élaborés dans le cadre de notre étude. Différentes méthodes de fabrication ou de traitement de données numériques sont également détaillées. Les expériences ont toutes été effectuées au sein du laboratoire PMMH à Jussieu et la totalité du dispositif a été conçue et fabriquée sur la durée du projet.

2.1 Matériel expérimental

2.1.1 Cuve à vagues et batteur

Matériel général Dans le cadre de notre expérience, le dispositif d'interaction vagues-structure est mis en place à l'aide du matériel suivant, photographié en FIGURE 8 :

- Une cuve en verre de paroi 8mm et de dimensions 250cm × 50cm × 20cm
- Un arrière-plan quadrillé (carreaux de 10mm) imprimé sur une bâche plastifiée 200cm x 50cm (pour la méthode de mesure par Schlieren (voir 2.2))
- Une caméra numérique Basler de résolution 2048x2048

Un système de vidange constitué d'une bonde d'évacuation placée dans le fond de la cuve, un flexible de diamètre 2cm et une valve de fermeture est ajouté pour simplifier la maintenance.

Commande moteur Le batteur à vagues est de type *flap-type*, conçu à partir d'un moteur électrique à courant continu 12-24V d'une puissance instantanée d'environ 12W, fournie par une alimentation électrique stabilisée. La commande du moteur est faite de manière numérique, entièrement par interfaçage en MATLAB via une carte micro-contrôleur Arduino UNO : un switch contrôle la puissance délivrée par l'alimentation de manière binaire. La caméra Basler est également interfacée avec MATLAB, ce qui permet de déclencher de manière synchronisée les actuateurs et l'acquisition vidéo. L'ensemble du dispositif électronique est détaillé en FIGURE 7.

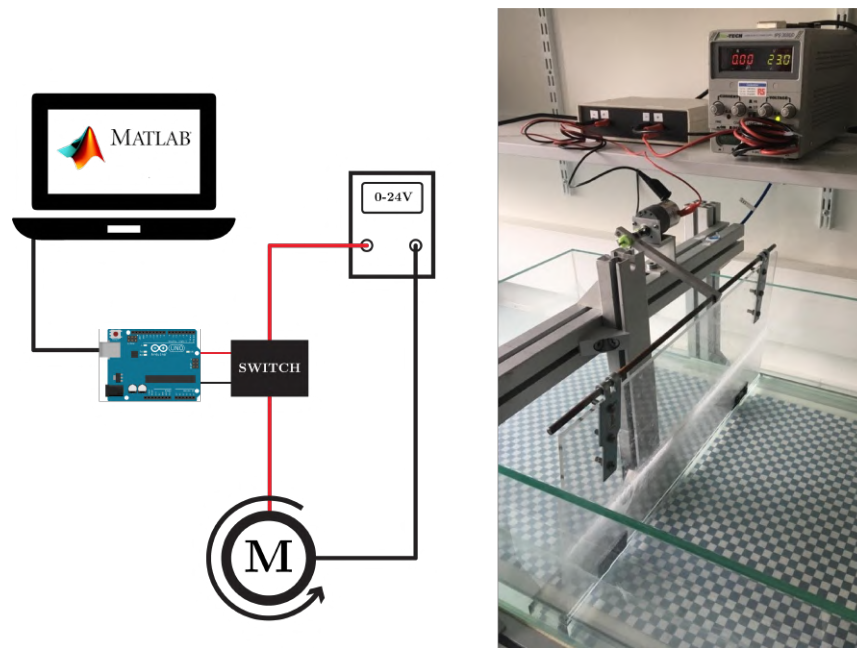


FIGURE 7 – Schéma et photographie du dispositif électronique de commande du batteur à vagues

Transmission mécanique Une transmission mécanique de type bielle-manivelle réalisée en aluminium est fixée sur le moteur DC, afin de transformer le mouvement de rotation du moteur en translation. Ce mouvement de translation est ensuite transmis à une plaque de plexiglas plongée dans l'eau et attachée au fond du bassin par des charnières inoxydables (liaison pivot). C'est cette dernière qui constitue l'actionneur responsable de la formation des vagues dans la cuve, en décrivant un mouvement de rotation périodique autour de son point de fixation : la période est fixée par la vitesse de rotation du moteur, l'amplitude du mouvement par les caractéristiques géométriques de la bielle-manivelle. Un schéma cinématique de fonctionnement de l'ensemble du batteur est reproduit en FIGURE 9.

Calibration Toutes les expériences pendant le projet sont menées avec une hauteur d'eau h comprise entre 8 et 11 centimètres, suffisante pour pouvoir considérer l'hypothèse dite "d'eau profonde" et éviter ainsi des effets indésirables dus à la topologie du fond de la cuve. Cette hypothèse est validée en mesurant la relation de dispersion de l'onde dans la cuve à vide pour une hauteur d'eau $h = 8.5\text{cm}$. Les résultats de cette calibration sont illustrés par la FIGURE 10. De même, on opère une calibration pour vérifier la linéarité entre consigne (tension imposée aux bornes du moteur) et fréquence des vagues produites, ainsi que le caractère monochromatique de ces dernières (voir 2.2 pour les détails sur les méthodes de mesure utilisées). Des tests à vide sont réalisés, dont les résultats sont présentés dans les FIGURE 11 et 12.

Absorbeur à vagues (plage) Après le batteur à vague, l'absorbeur, ou plage, est l'élément le plus important d'un bassin de test à vagues. Il a pour fonction de limiter la réflexion de l'onde sur l'extrémité de la cuve, puisque cette dernière introduit dans les longueurs d'ondes additionnelles dans les vagues produites, rendant les mesures plus complexes et moins fiables.

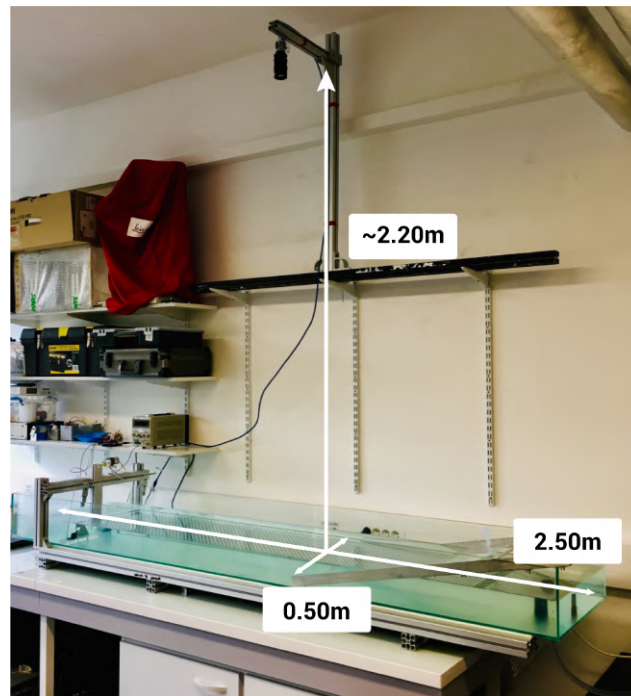


FIGURE 8 – Photographie et dimensions de la cuve à vagues et du système d’acquisition vidéo. La zone d’intérêt filmée par la caméra mesure environ 1m20 (voir FIGURE 9); la hauteur à laquelle cette dernière est placée est donc suffisante pour négliger d’éventuelles distorsions au bord de la zone d’acquisition.

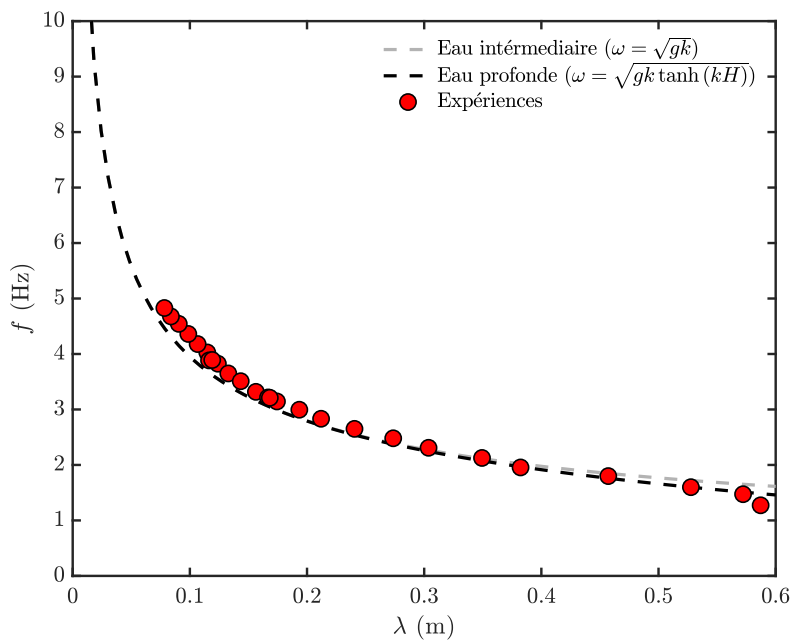


FIGURE 10 – Mesure de la relation de dispersion pour notre dispositif expérimental, pour une hauteur d'eau $h = 8.5\text{cm}$. Les motifs rouges représentent les mesures, les pointillés les valeurs théoriques des modèles en eau profonde ou intermédiaire.

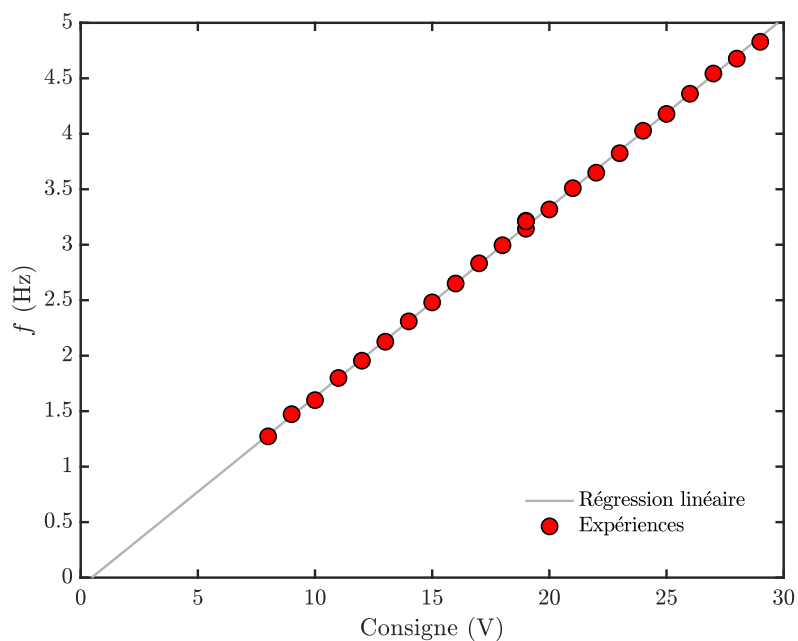


FIGURE 11 – Validation de la linéarité de la fréquence temporelle des vagues en fonction de la consigne en tension appliquée au moteur électrique du batteur.

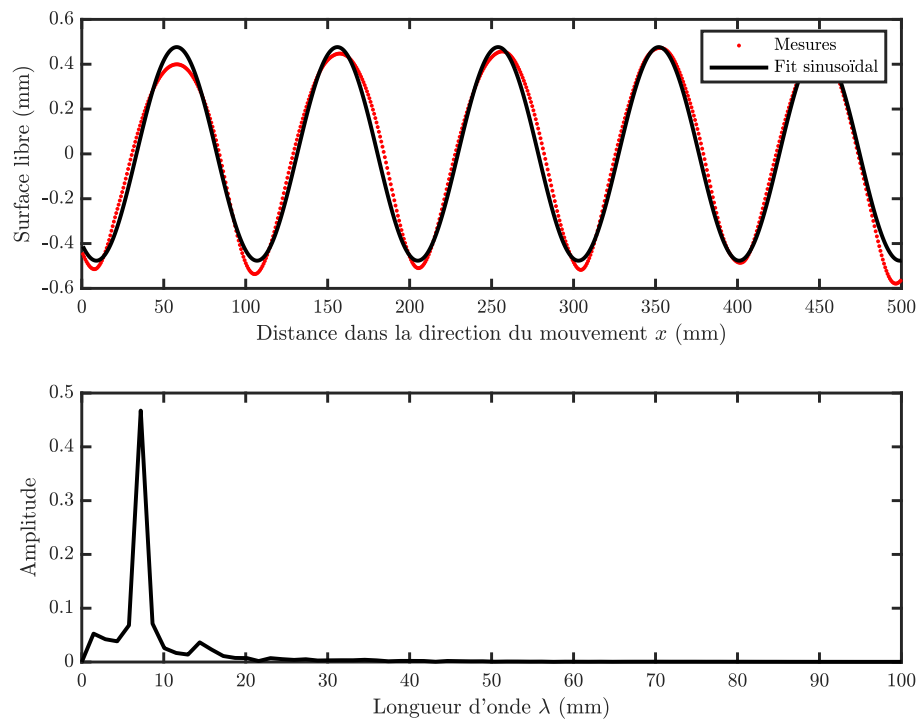


FIGURE 12 – Exemple de mesure de surface libre (voir 2.2 pour les détails). Les mesures sont moyennées dans la direction y transversale au mouvement et la dissipation naturelle est corrigée. Haut : approximation de la surface libre du liquide par une sinusoïde de la forme $A \cos(2\pi \frac{x}{\lambda} + \phi)$ ($r^2=0.982$); bas : transformée de Fourier spatiale du signal précédent (mesure), présentant une longueur d'onde fondamentale clairement isolée.

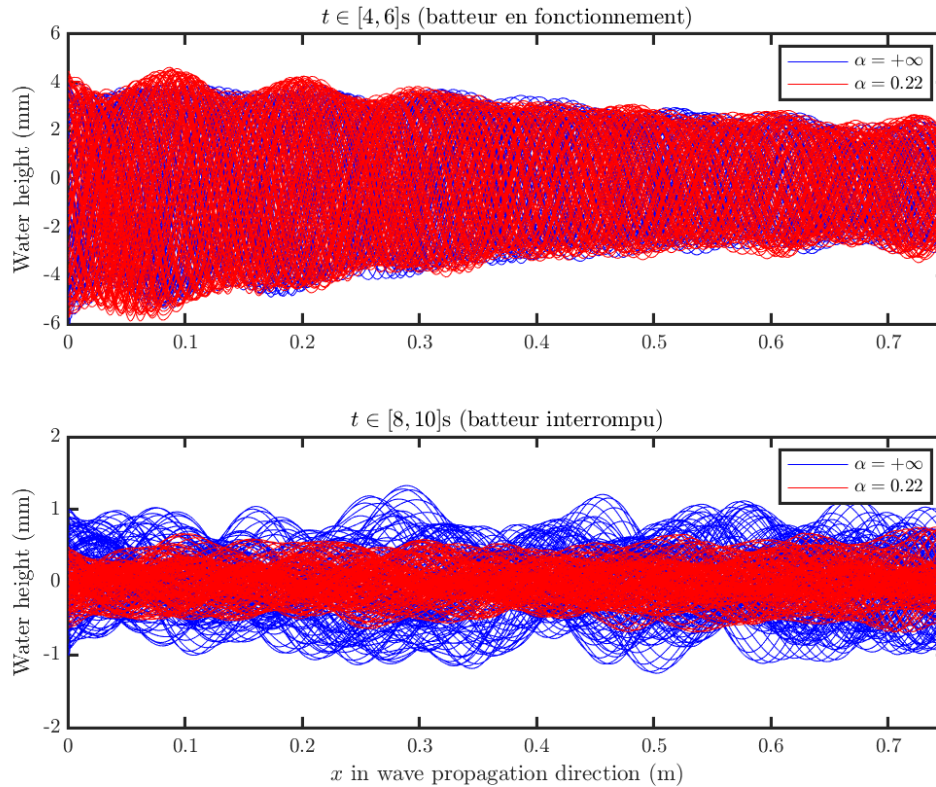


FIGURE 13 – Expérience de réflexion dans la cuve à vide, sans plage ($\alpha = +\infty$, en bleu) et avec une plage de 12.6° ($\alpha = 0.22$, en rouge).

Il existe de nombreux type de plages, qui peuvent essentiellement être divisée en deux grands groupes : les absorbeurs actifs et passifs. Les absorbeurs actifs sont des systèmes contrôlés visant à réduire la réflexion pour des longueurs d’onde et des caractéristiques de cuve connues. Ils sont donc *a priori* plus efficaces, mais souvent beaucoup plus difficiles à mettre en oeuvre et coûteux. À l’inverse, les plages passives sont généralement de simples surface imperméables, pouvant suivre divers profils [Ouellet and Datta, 1986] : nous choisissons pour notre dispositif la forme la plus courante, un plan incliné en plexiglas, dont la caractéristique principale est l’angle α formé avec l’horizontale.

Pour évaluer l’efficacité d’une plage donnée, une onde est envoyée dans la cuve à vide pendant environ 6s pour qu’un régime permanent s’établisse, puis le batteur est arrêté. On observe la déformation de la surface libre au passage de l’onde, puis sa réflexion quelques secondes après l’arrêt : la comparaison de l’amplitude dans ces deux cas donne accès à un coefficient de réflexion à vide, qui permet d’estimer l’efficacité d’une plage donnée. Un exemple de mesure obtenue est donné en FIGURE 13.

Le coefficient de réflexion est calculé de la manière suivante :

$$K_r = \frac{\bar{A}_r}{\bar{A}_0}$$

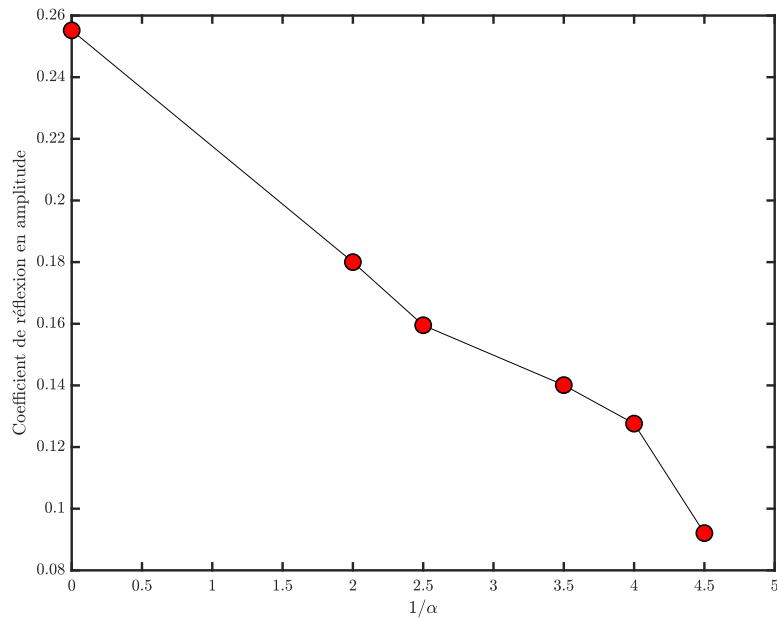


FIGURE 14 – Coefficient de réflexion en amplitude K_r en fonction de l’inverse de l’angle d’inclinaison α (en rad) entre la plage et l’horizontale.

où \bar{A}_r est la moyenne temporelle de l’amplitude l’onde réfléchie lorsque le batteur est arrêté (amplitude calculée à partir d’un fit sinusoïdal) et \bar{A}_0 celle de l’onde initiale. La FIGURE 14 répertorie les différentes valeurs de K_r mesurées pour des angles de plage allant de $\alpha = +\infty$ (pas de plage) à $\alpha = 0.22$ (12.6°). La dernière valeur de $\alpha = 0.22$, correspondant à une plage de 90cm de longueur et 20cm de hauteur, est choisie, puisqu’elle permet d’atteindre une réflexion en amplitude inférieure à 10%. Cette valeur est très satisfaisante puisqu’elle est comparable à celle rapportées par Ouellet and Datta [1986] pour des dispositifs équivalents.

2.1.2 Piliers flexibles

Matériau et résonance La structure immergée que nous étudions est constituée d’un ensemble de poteaux flexibles fixés dans le fond de la cuve. Ces poteaux sont fabriqués en silicone médical à prise rapide (Elite Double), un produit habituellement utilisé en orthodontie pour réaliser des moulage. Un avantage majeur de ce produit est sa facilité d’utilisation, qui rend la fabrication en grande série de poteaux identiques très aisée : il suffit d’utiliser comme moule des sections de tuyau de plomberie. Le silicone existe en différentes dureté Shore A, qui correspondent à des coefficients d’élasticité, via la relation non-linéaire suivante :

$$E = e^{0.0235 S_A - 0.6403}$$

où E est le module d’Young du matériau (en MPa) et S_A la dureté Shore A. Cette relation est valide pour des Shore A suffisamment élevées (> 20). Les poteaux que nous utilisons sont en grande majorité de module d’Young $E = 0.88\text{MPa}$ ($S_A = 22$), et quelques uns $E = 1.12\text{MPa}$ ($S_A = 32$).

Leclercq and De Langre [2018] et ont montré que, dans les cas où la force de traînée domine, le transfert d'énergie sous forme élastique est maximal pour une déformation maximale de l'obstacle, atteinte lorsque la fréquence des vagues est égale à la fréquence propre naturelle des poteaux. Toutes les expériences seront donc réalisées à la fréquence de résonance, déterminée par une expérience test : un seul poteau est placé au milieu de la cuve (à environ 50cm du batteur pour éviter des effets de bord dus à la présence de ce dernier) ; l'amplitude du trajet décrit par son sommet est contrôlée pour 10 différentes fréquences f dans l'intervalle $[2\mathcal{I} 5]$ Hz (voir ci-après pour les détails sur le tracking et la fixation des poteaux). Les résultats de cette expérience sont reportés FIGURE 15. Les fréquences de résonance obtenues sont : $f^* = 3.81$ Hz pour $E = 0.88$ MPa et $f^* = 4.47$ Hz pour $E = 1.11$ MPa.

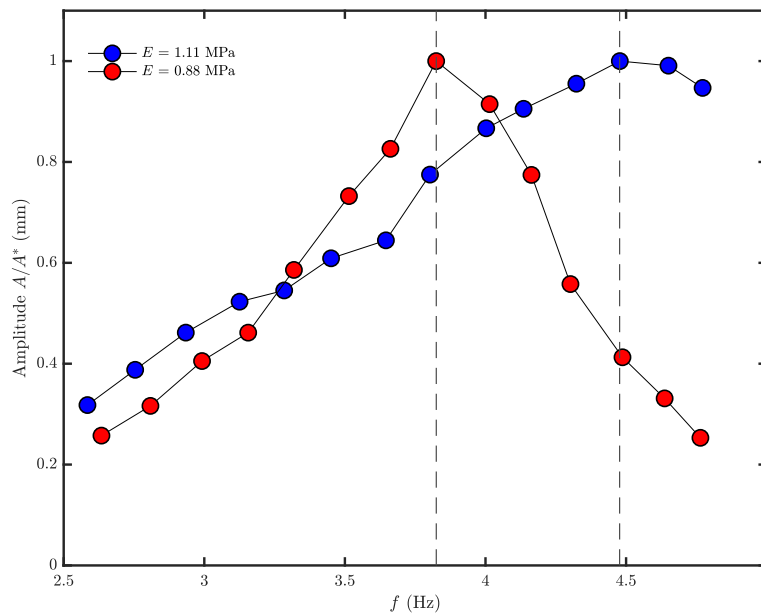


FIGURE 15 – Détermination expérimentale de la fréquence de résonance des poteaux pour 2 rigidités différentes. A correspond à l'amplitude des oscillations mesurées pour un poteau seul placé dans la cuve, A^* est l'amplitude maximale mesurée.

Liaison encastrement La question de la liaison entre le poteau et le fond de la cuve est une des difficultés inhérentes à l'utilisation d'un matériau très élastique. L'idée initiale pour réaliser cette liaison est d'utiliser de petites ventouses en matériau plastique transparent (20mm de diamètre, voir FIGURE 16). La pâte silicone est directement coulée sur la ventouse, de manière à emprisonner celle-ci et former un ensemble solidaire. Un avantage majeur de ce mode de liaison réside dans sa simplicité de mise en œuvre et sa discrétion, la ventouse étant quasiment invisible dans les visualisations capturées par la caméra. Cependant, cette solution n'est pas satisfaisante puisque la liaison s'apparente plus à une rotule, modifiant de fait de nombreuses propriétés des poteaux, dont la fréquence de résonance. Elle est également trop aléatoire et les poteaux sont souvent penchés (si la ventouse est mal centrée par exemple), avec pour conséquence un comportement oscillatoire non-isotrope.

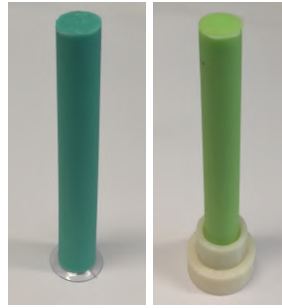


FIGURE 16 – Illustration des méthodes de liaison des poteaux avec le fond de la cuve. gauche : avec une ventouse, droite : avec une base en ABS imprimée en 3D.

La solution retenue est d'utiliser une base en matériau plastique ABS, fabriquée en impression 3D. L'objectif de cette dernière est d'appliquer une pression uniforme sur le pied du poteau, via une rainure (voir les plans reproduits en Annexe et le visuel FIGURE 16). Cette méthode, quoique plus complexe et coûteuse en temps et en matériel, permet d'obtenir un comportement isotrope et une bonne répétabilité des résultats expérimentaux. Pour la fixation, une pièce de Lego circulaire est collée sur la plan inférieur de la base et un plan Lego est placé dans le fond de la cuve.

Tracking Le suivi temporel du sommet du poteau en oscillation est essentiel : il permet notamment de remonter à des informations sur la quantité d'énergie dissipée de manière élastique par la structure (voir 5). La difficulté de ce traitement d'image réside dans l'utilisation d'un quadrillage noir et blanc pour la méthode de mesure de déformation de la surface libre (voir 2.2), ce qui empêche le recours aux méthodes d'identification du sommet basées sur le contraste, comme pratiqué habituellement dans ce genre de cas. Dans cette optique, des supports portant un motif circulaire (cercle blanc sur fond noir) sont collés sur le sommet des poteaux, et un algorithme de détection de cercle est utilisé pour les identifier sur les images enregistrées par la caméra. L'identification de ces cercles sur chaque frame des films enregistrés permet un suivi temporel de la trajectoire des sommets des poteaux.

Une illustration de l'ensemble du dispositif installé est visible en FIGURE 17, ainsi qu'un exemple de suivi temporel de la position des sommets des poteaux en FIGURE 18.



FIGURE 17 – gauche : Vue de la fixation inférieure du poteau avec une pièce Lego circulaire, droite : Installation complète des poteaux équipés dans la cuve, pour une disposition 4×2 .

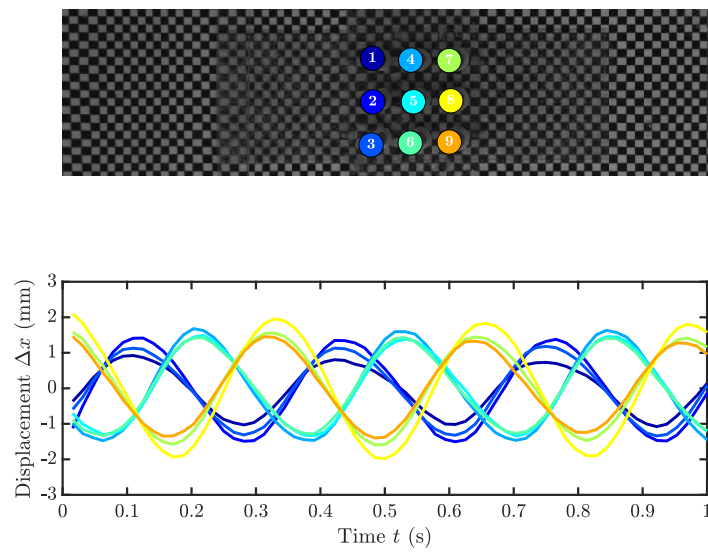


FIGURE 18 – Exemple de tracking sur 1s du mouvement des poteaux disposés en 3×3 ($h = 10.5$ cm, $f = 2.9$ Hz) : suivi de la position en x (sens de déplacement des vagues). Les couleurs de l'image supérieure correspondent à celles du graphique.

2.2 Méthodes de mesure

2.2.1 Mesure de déformation d'une surface libre

Principe général Afin de mesurer la déformation de surfaces libres, la méthode d'imagerie Schlieren développée par Wildeman [2018] est employée. Ce schéma numérique de *synthetic Schlieren imaging* (SSI) utilise un motif 2D périodique (quadrillage noir et blanc de type plateau d'échecs) alors que les méthodes de SSI antérieures se basent sur un motif ponctuel aléatoire [Moisy et al., 2009]. Elle présente l'avantage d'être précise, simple de mise en œuvre et robuste.

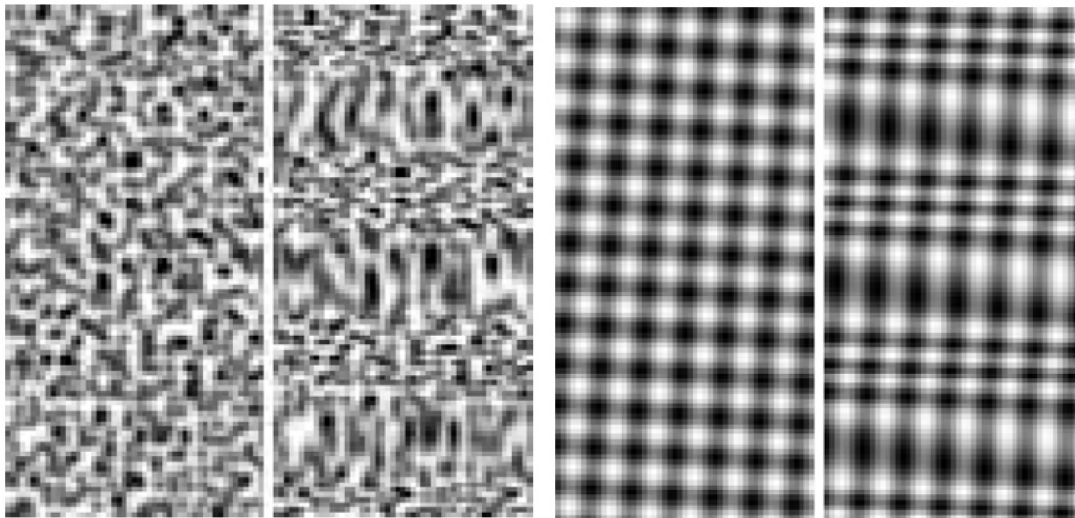


FIGURE 19 – Configuration de référence et déformée permettant la visualisation d'une onde de surface. (gauche : motif ponctuel aléatoire ; droite : quadrillage régulier). [Wildeman, 2018]

Le montage expérimental nécessaire est particulièrement élémentaire, puisque seuls sont nécessaires un quadrillage imprimé et une caméra numérique, comme représenté FIGURE 20.

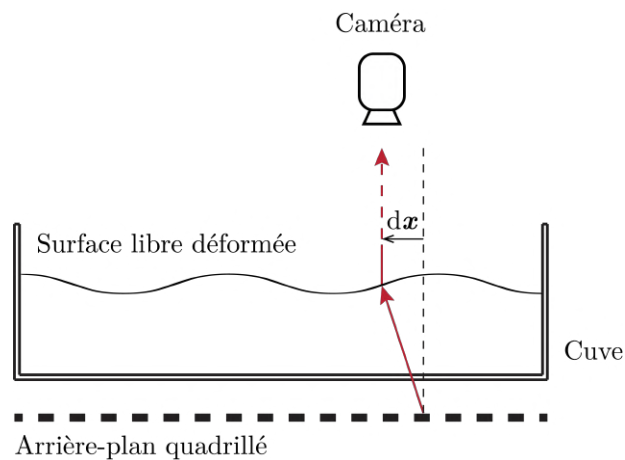


FIGURE 20 – Montage expérimental pour la mesure de déformation de surface libre

Le principe physique de la mesure est illustré FIGURE 20 : les rayons lumineux issus de l'arrière-plan sont déviés au passage des inhomogénéités optiques provoquées par la déformation de l'interface liquide/air. Cette déviation se manifeste par des images distordues enregistrées par la caméra, comme dans la FIGURE 19. On suppose les trois hypothèses suivantes vérifiées par la suite :

1. La parallaxe est faible : la taille de la zone filmée est beaucoup plus petite que la distance entre l'arrière-plan et la caméra
2. Les pentes des déformations observées sont faibles : la valeur de l'angle α entre le vecteur normal à la surface \mathbf{n} et le vecteur de direction verticale \mathbf{e}_z reste petite
3. Les amplitudes des déformations observées sont faibles : si on note $h = \bar{h} + \eta(\mathbf{x})$ la position de la surface, on a $|\eta| \ll \bar{h}$.

Outils mathématiques On recherche par ce biais à quantifier le déplacement de l'interface en un point \mathbf{x} , noté $\mathbf{u}(\mathbf{x})$. On dispose pour cela de deux images I_r et I_d (configuration de référence et configuration déformée), telles que

$$I_d(\mathbf{x}) = I_r(\mathbf{x} - \mathbf{u}(\mathbf{x})). \quad (1)$$

La configuration de référence peut être décrite mathématiquement comme suit :

$$I_r(\mathbf{x}) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} \sum_{l \in \mathbb{Z}} A_{kl} e^{i \left(\frac{2\pi k}{\lambda_1} \mathbf{e}_1 + \frac{2\pi l}{\lambda_2} \mathbf{e}_2 \right) \cdot \mathbf{x}}, \quad (2)$$

où λ_1 (resp. λ_2) est la longueur d'onde du quadrillage (taille des carreaux) dans la direction \mathbf{e}_1 (resp. \mathbf{e}_2), où \mathbf{e}_1 et \mathbf{e}_2 sont linéairement indépendants. Ainsi, pour un quadrillage constitué de carreaux de côté h , si $\mathbf{e}_1 = \mathbf{e}_x$ et $\mathbf{e}_2 = \mathbf{e}_y$, on a $\lambda_1 = \lambda_2 = h$.

$$I_d(\mathbf{x}) = I_r(\mathbf{x} - \mathbf{u}(\mathbf{x})) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} \sum_{l \in \mathbb{Z}} A_{kl} e^{i \left(\frac{2\pi k}{\lambda_1} \mathbf{e}_1 + \frac{2\pi l}{\lambda_2} \mathbf{e}_2 \right) \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{u}(\mathbf{x}))}, \quad (3)$$

À partir des deux équations 2 et 3, un filtrage dans le domaine fréquentiel permet d'isoler

$$\begin{aligned} f_{r,1}(\mathbf{x}) &= A_{1,0} e^{i \frac{2\pi}{\lambda_1} \mathbf{e}_1 \cdot \mathbf{x}} \\ f_{d,1}(\mathbf{x}) &= A_{1,0} e^{i \frac{2\pi}{\lambda_1} \mathbf{e}_1 \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{u}(\mathbf{x}))}. \end{aligned} \quad (4)$$

On extrait ensuite $\mathbf{u}(\mathbf{x})$ en calculant

$$\Phi_1(\mathbf{x}) = \Im(\ln(f_{d,1} f_{r,1}^*)) = -\frac{2\pi}{\lambda_1} \mathbf{e}_1 \cdot \mathbf{u}(\mathbf{x}) \quad (5)$$

De la même manière, on peut calculer

$$\Phi_2(\mathbf{x}) = \Im(\ln(f_{d,2} f_{r,2}^*)) = -\frac{2\pi}{\lambda_2} \mathbf{e}_2 \cdot \mathbf{u}(\mathbf{x}) \quad (6)$$

Puisque \mathbf{e}_1 et \mathbf{e}_2 sont linéairement indépendants, les équations 5 et 6 forment un système d'équation linéaire sur $\mathbf{u}(\mathbf{x})$ qui peut être résolu directement. Les déplacements ainsi mesurés sont proportionnels au premier ordre au gradient du déplacement vertical de l'interface ∇h :

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}) \approx -H \left(1 - \frac{n_{air}}{n_{eau}} \right) \nabla h(\mathbf{x}) \quad (7)$$

où H est la distance entre l'arrière-plan et l'interface au repos et n_{eau} (resp. n_{air}) est le indice de réfraction de l'eau (resp. de l'air).

On notera que, en première approximation, le plus petit déplacement mesurable de cette manière est de l'ordre de λ , c'est-à-dire de la taille des carreaux du quadrillage.

Exemples de mesure Toutes les expériences sont réalisées pendant le projet avec des carreaux de côté 10mm suffisant pour les amplitudes en jeu et évitant les aberrations optiques. On reproduit ci-après quelques exemples de mesures réalisées avec le dispositif présenté en 2.

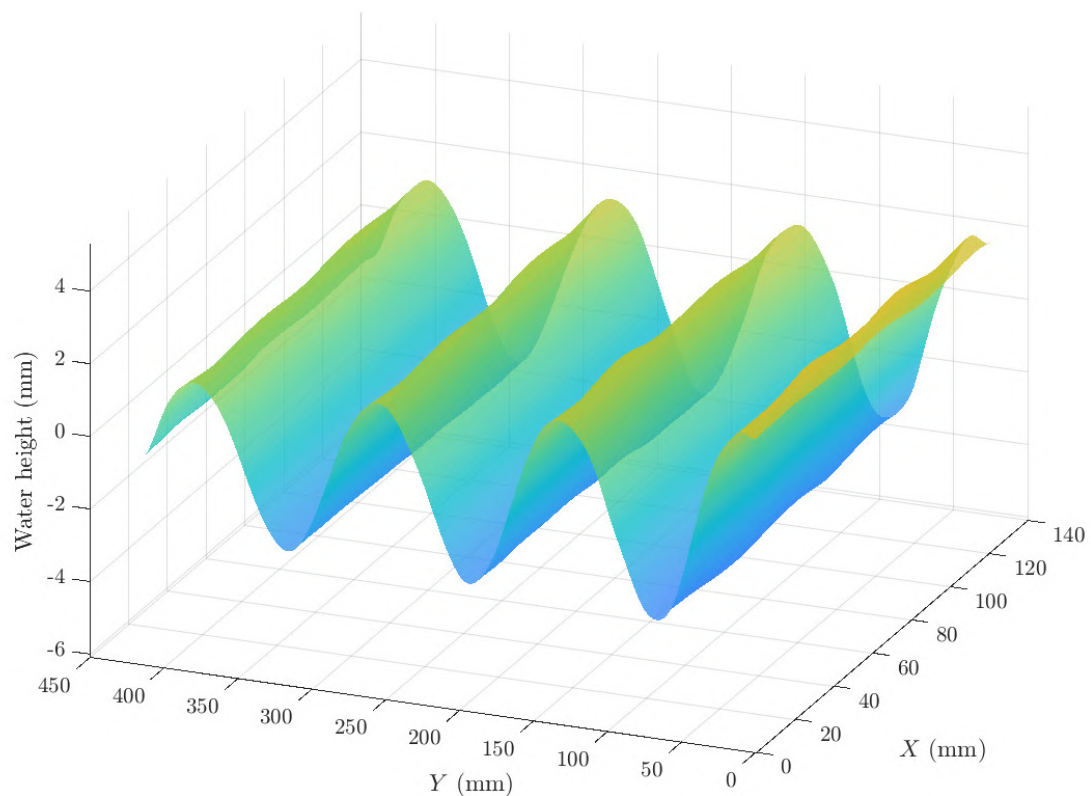


FIGURE 21 – Reconstruction 3D des ondes de surface dans la cuve à vide ($h = 8.4\text{cm}$, $f = 3.2\text{Hz}$)

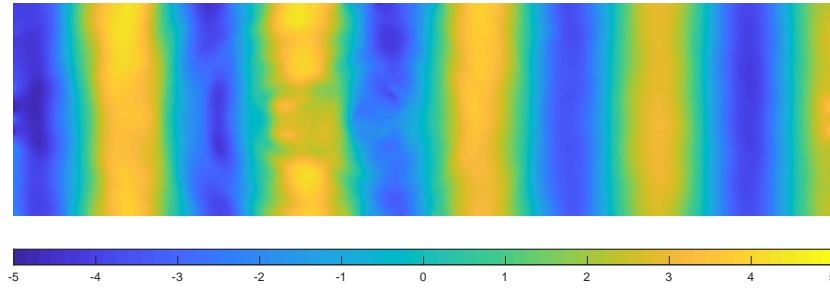


FIGURE 22 – Visualisation 2D des ondes de surface (mm) dans la cuve avec 2 poteaux alignés horizontalement à une distance longitudinale $l = 6.4\text{cm}$ ($h = 11\text{cm}$, $f = 4.3\text{Hz}$). Taille de la fenêtre de visualisation : $79 \times 22\text{cm}$.

2.2.2 Mesure des coefficients de réflexion et transmission

Méthode Au cours des expériences menées dans la cuve à vagues, la carte d'élévation de la surface libre est mesurée par la méthode SSI (voir 2.2.1) lorsque le régime permanent est atteint, puis moyennée dans la direction transversale au déplacement des vagues. La fréquence d'acquisition de la caméra est de 64fps.

Les coefficients de réflexion et de transmission sont définis comme suit :

$$K_r = \frac{H_r}{H_{r0}} \quad \text{et} \quad K_t = \frac{H_t}{H_{t0}} \quad (8)$$

où H_r est l'amplitude des vagues réfléchies dans la zone amont des poteaux et H_t celle des vagues transmises dans la zone aval. H_{r0} et H_{t0} sont les amplitudes de la cuve à vide dans les mêmes zones : les coefficients sont normalisés par rapport au comportement des vagues dans la cuve à vide afin de prendre en compte la dissipation naturelle de cette dernière, due aux effets de bord et aux réflexions (voir 3.1 pour les détails sur la mesure de la dissipation naturelle de la cuve). Pour le coefficient de transmission, ce calcul est simple puisque l'amplitude de l'onde en aval est directement mesurable. En revanche, une démodulation est nécessaire pour accéder à l'amplitude de l'onde réfléchie puisqu'elle est sommée avec l'onde incidente. En exprimant avec des exponentielles complexes la somme de l'onde réfléchie η_R et de l'onde initiale η_0 il vient :

$$\begin{aligned} \eta_0 + \eta_R &= H_r e^{i(\omega t - kx)} + H_{r0} e^{i(\omega t + kx)} \\ &= H_r (e^{i(\omega t - kx)} + e^{i(\omega t + kx)}) + (H_{r0} - H_r) e^{i(\omega t + kx)} \\ &= 2H_r e^{i\omega t} \cos(kx) + (H_{r0} - H_r) e^{i(\omega t + kx)} \end{aligned}$$

On considère l'enveloppe de cette dernière expression $\Phi = (H_{r0} - H_r) e^{i(\omega t + kx)}$. En divisant $\Phi(x)$ par H_{r0} (mesurable indépendamment, voir 3.1), on obtient une fonction sinusoïdale d'amplitude $1 - H_r/H_{r0}$ qui permet de remonter à la valeur de K_r . Ces différents calculs théorique et leur application à une mesure dans un cas réel sont illustrés par la FIGURE 23.

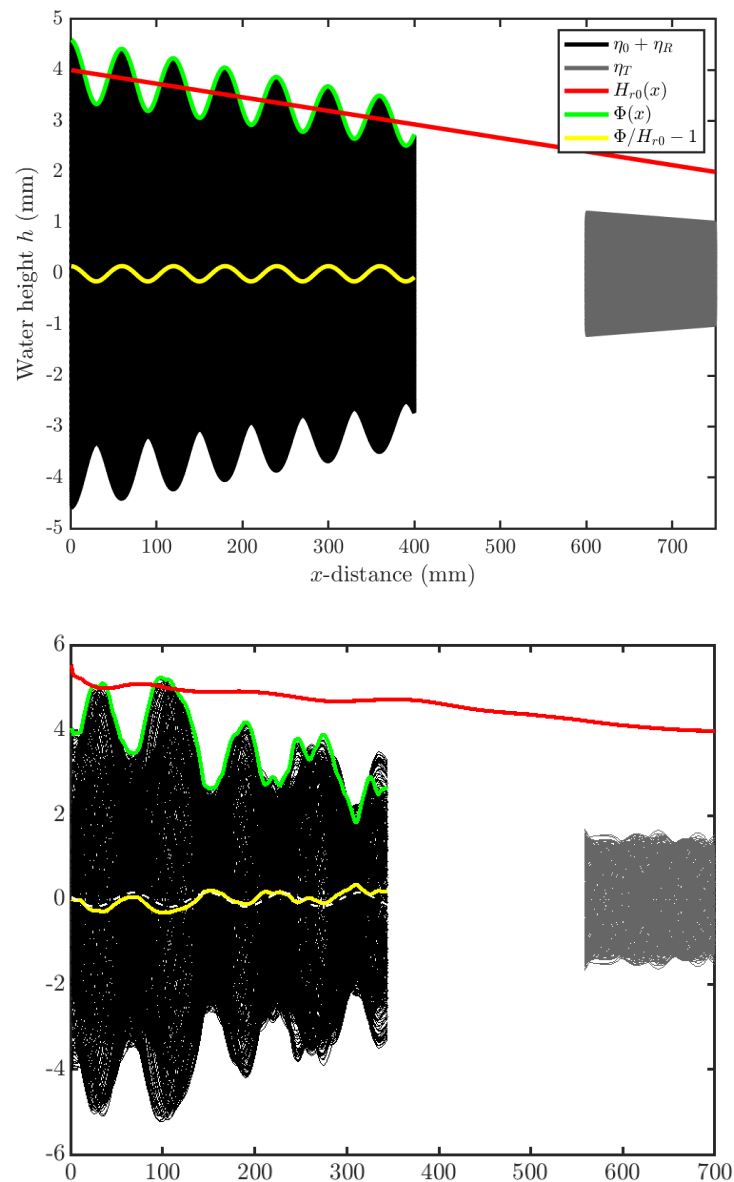


FIGURE 23 – Haut : modèle théorique simplifié du comportement de l'onde de surface et méthode de démodulation de l'onde réfléchie pour le calcul du coefficient de réflexion K_r (voir détails ci-dessus). Bas : application de cette méthode de calcul à un cas réel de mesure (expérience à $h = 10.2\text{cm}$ et $f = 4.02\text{Hz}$ pour une matrice régulière de poteaux en 3×3 , $l = 7.2\text{cm}$, $d = 4.8\text{cm}$).

Contrôle de l'invariance Pour confirmer la validité des méthodes de mesure de K_r et K_t exposées précédemment, il convient de vérifier que les valeurs relevées ne dépendent pas, ou faiblement, des dimensions des zones aval et amont dans lesquelles les calculs sont réalisés. La FIGURE 25 valide cette condition : une expérience-test est réalisée pour une configuration de poteaux 3×3 , puis les dimensions des zones sont variées de manière graduelle.

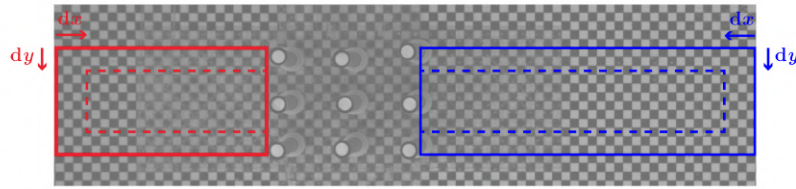


FIGURE 24 – Description des zones de mesure de K_r et K_t et des variations dx et dy faites sur ces dernières pour valider l’invariance de la méthode de mesure (voir FIGURE 25).

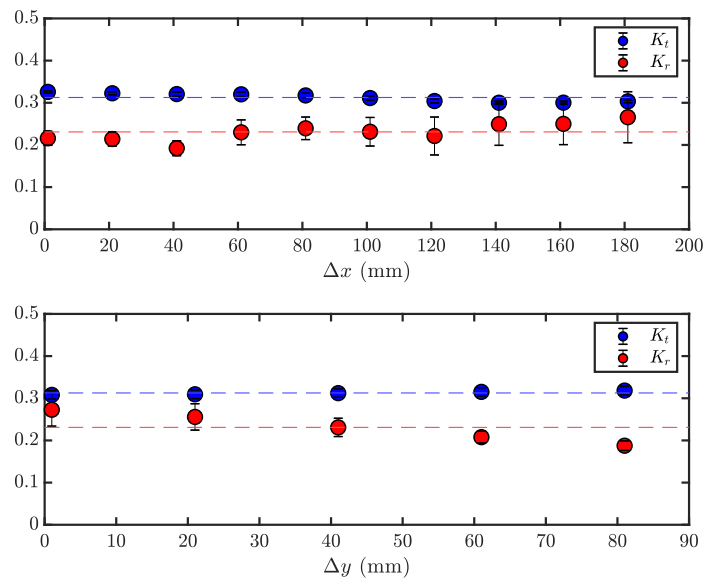


FIGURE 25 – Variation des coefficients K_r et K_t pour des modification Δx et Δy de la taille des fenêtres de mesure (voir illustration en FIGURE 24). Expérience menée à $h = 10.2\text{cm}$ et $f = 4.02\text{Hz}$ pour une matrice régulière de poteaux en 3×3 ($l = 7.2\text{cm}$, $d = 4.8\text{cm}$).

Ces données confirment que les valeurs de K_r et K_t ne dépendent que peu des dimensions des zones de relevé. De faibles variations sont tout de même observées, notamment pour K_r . En effet, lorsque la taille de la zone de relevé devient trop petite (Δx et Δy grands), la mesure n’est plus pertinente et des aberrations de mesures peuvent survenir, puisque la dimension longitudinale de la zone est inférieure à une longueur d’onde, ce qui ne permet pas d’approximer efficacement l’onde mesurée par un sinus par exemple.

3. Résultats expérimentaux

L'objectif de ce projet est d'analyser expérimentalement la réponse mécanique d'un ensemble de poteaux élastiques immergés, en particulier d'un point de vue énergétique. À la manière des études portant sur les ondes électromagnétiques, il s'agit d'estimer la part d'énergie de l'onde de surface réfléchie et transmise par la structure, ainsi que celle dissipée par cette dernière. Cette estimation se fait notamment par le calcul de coefficients de réflexion et de transmission en amplitude (K_r et K_t).

La paramètres d'intérêt examinés sont les distances séparant les poteaux et l'organisation de ces derniers, en comparant des dispositions régulière ou en quinconce. La finalité de l'étude menée est l'obtention d'une organisation spatiale optimale, maximisant l'énergie dissipée par le système (dans une optique de récupération d'énergie houlomotrice) et de minimisant l'énergie transmise/maximisant l'énergie réfléchie (dans une optique de protection du littoral).

L'analyse est séparée en plusieurs étapes. Premièrement, une étude préliminaire permet d'estimer l'énergie dissipée par un poteau seul, afin d'établir un point de comparaison essentiel pour quantifier l'efficacité des configurations géométriques étudiées par la suite. Elle met également en évidence et quantifie la dissipation naturelle dans la cuve à vide. Dans un second temps, une étude détaillée sur une "cellule" de base de 9 poteaux (3×3) est menée. L'effet de la distance longitudinale l entre les poteaux est observé avec un intérêt particulier, dans la continuité des travaux réalisés dans la thèse de Nové-Josserand [2018] (expérience similaire réalisée sur des lames oscillantes). Finalement, nous retournons à l'échelle de quelques poteaux (1, 2 ou 3), afin de tenter de comprendre dans les détails leur interactions et expliquer les résultats de l'étude paramétrique précédente grâce à une analyse plus détaillée des images récoltées. Nous nous intéressons en particulier à l'onde "ré-émise" individuellement par chaque poteaux lorsqu'il oscille sous l'effet des vagues.

3.1 Étude préliminaire : dissipation naturelle de la cuve et énergie d'un poteau seul \bar{E}

Conditions expérimentales Les vagues produites par le batteur décrit en 2 peuvent être considérées comme monochromatiques comme l'illustre la FIGURE 12, qui montre une décomposition spectrale d'une onde de surface mesurée par la technique SSI avec une fréquence fondamentale nettement isolée. Cette hypothèse valide l'utilisation d'approximations sinusoïdales pour l'onde moyennée sur la ligne centrale de la zone de mesure, ainsi que pour les trajectoires des sommets des poteaux (voir également FIGURE 18).

Dans l'océan, les ondes gravitaires de surfaces subissent très peu de dissipation d'énergie à une fréquence donnée : certaines vagues peuvent voyager sur plusieurs centaines de kilomètres sans voir leur amplitude diminuer. À l'inverse, dans le cadre de notre expérience, la dimension réduite de la cuve et le fait que cette dernière constitue un milieu de propagation beaucoup plus borné que la mer implique une forte dissipation. Ainsi, dans notre cas, l'amplitude des vagues dépend fortement de nombreux facteurs physiques et varie dans la direction longitudinale x , en raison de la dissipation naturelle de la cuve à vide due à la présence des bords et aux réflexions : la fréquence temporelle f des vagues ainsi que la hauteur d'eau au repos h peuvent notamment avoir une influence. Évaluer cette dissipation naturelle est extrêmement important pour l'estimation

des coefficients de réflexion et de transmission par la suite. En effet, la mesure de cette amplitude pour différentes conditions expérimentales viendra corriger les amplitudes mesurées en présence des poteaux, afin de rendre comparables les multiples configurations géométriques testées.

Une expérience-test dans la cuve à vide est menée pour quantifier cette dissipation naturelle. Pour différentes fréquences temporelles dans notre intervalle d'intérêt ($[3;4]$ Hz), l'enveloppe de la fonction décrivant le surface libre est relevée (de manière similaire à la technique décrite en FIGURE 23). Cette enveloppe est supposées décrire la variation d'amplitude le long de la direction x de propagation des vagues. Les résultats de cette pré-étude pour une hauteur d'eau au repos $h = 11$ cm sont reproduits en FIGURE 26.

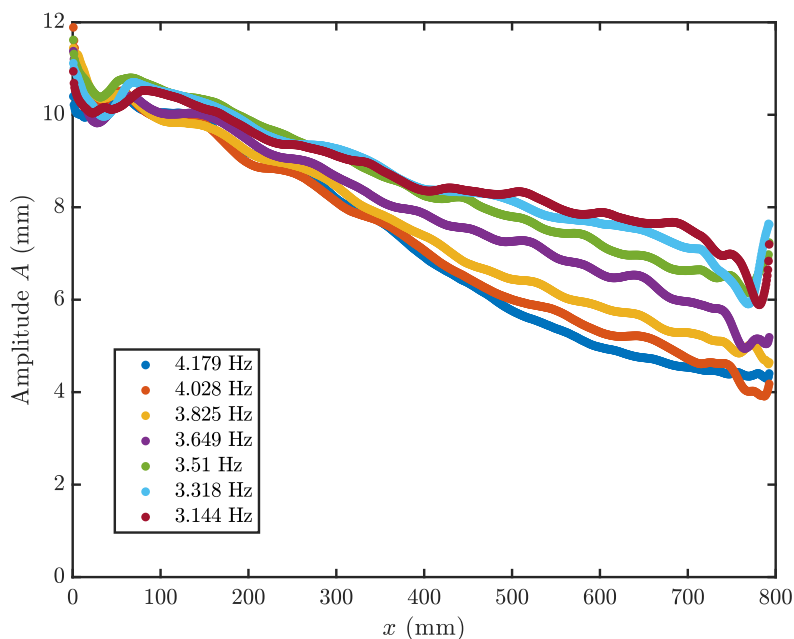


FIGURE 26 – Dissipation naturelle dans la cuve à vide en fonction de la distance longitudinale x , pour une hauteur d'eau au repos $h = 11$ cm.

On observe que la dissipation naturelle augmente clairement avec f . Ces données sont réutilisées dans le cadre du calcul de K_r et K_t par la suite, comme décrit dans 2.2.2.

Énergie d'un poteau Pour disposer d'un point de comparaison pour l'énergie élastique d'un ensemble de poteaux mesurée par la suite, la suivi temporel d'un poteau unique soumis aux vagues est réalisé. La position de son sommet au cours du temps est enregistrée via la méthode de tracking décrite précédemment (voir 18). L'énergie élastique dissipée dépend du carré de l'amplitude de la vibration du poteau (voir Annexes) : pour accéder à cette amplitude, un fit sinusoïdal est calculé sur la trajectoire en x du sommet, pour différentes positions initiales de ce dernier. Les résultats de cette calibration sont visibles en FIGURE 27.

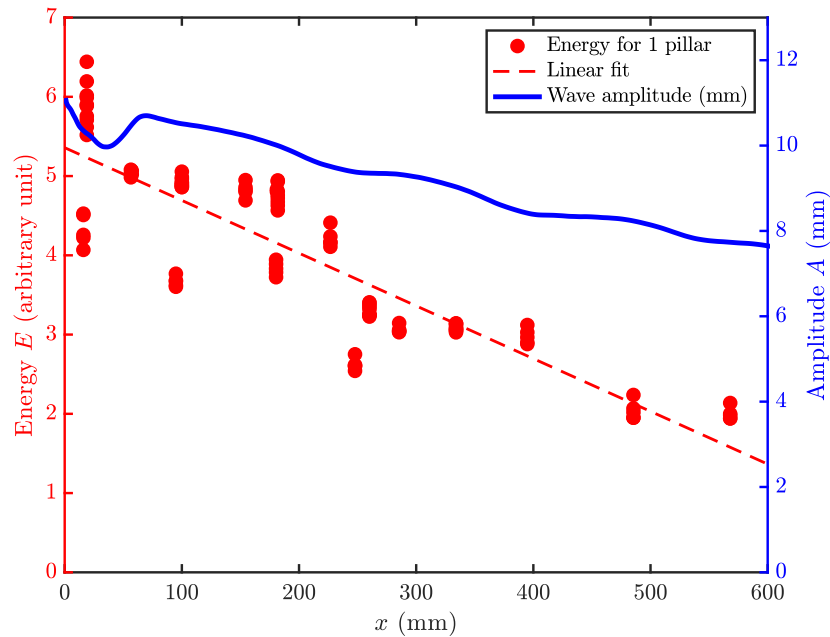


FIGURE 27 – En bleu : Dissipation naturelle dans la cuve à vide pour $h = 11\text{cm}$ et $f = 4.02\text{Hz}$. En rouge : Énergie (unité arbitraire) pour un poteau seul placé à différents x

Pour assurer la validité de cette mesure, elle est répétée pour différents poteaux, de légères différences dans la liaison mécanique avec la base pouvant potentiellement intervenir et modifier l'amplitude relevée. Comme attendu, l'énergie mesurée de cette manière dépend fortement de la position en x , puisque l'amplitude des vagues suit la même dépendance en raison de la dissipation naturelle de la cuve. Une régression linéaire est appliquée aux résultats afin d'extraire un coefficient linéaire de dissipation dépendant de la distance à la source de vagues.

Pour la configuration 3×3 choisie pour les expériences paramétriques, l'énergie d'un poteau \bar{E} est choisie égale à l'énergie d'un poteau placé au niveau de la colonne centrale. Ces mesures permettent ensuite de normaliser toutes les énergies relevées : si l'énergie mesurée pour une configuration géométrique donnée divisée par \bar{E} est supérieure à 1, elle est plus efficace pour dissiper élastiquement l'énergie que ne le seraient un ensemble de 9 poteau isolé. On met de cette manière en évidence l'émergence d'un comportement d'ensemble, attestant une forme d'interaction entre les poteaux. Quantifier ces interactions et en comprendre les origines est l'objet de l'étude paramétrique décrite ci-après.

3.2 Étude paramétrique d'une structure modèle 3×3

Afin de d'estimer la capacité d'un ensemble de poteaux à prélever de l'énergie à une onde de surface et à la dissiper, nous étudions dans cette partie un ensemble simple de 9 poteaux organisés en 3 colonnes et 3 lignes. Cette configuration est choisie pour que les interactions ne soient pas trop complexes en raison d'un nombre trop important de poteaux, mais qu'un comportement de "groupe" puisse émerger et être observable.

Les paramètres expérimentaux (distances et organisation) illustrés dans la FIGURE 28 sont ceux choisis pour décrire le système.

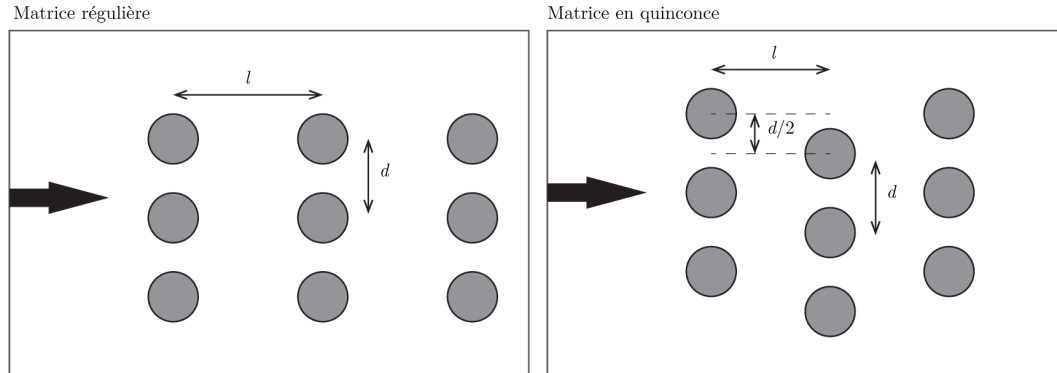


FIGURE 28 – Paramètres expérimentaux et organisations géométriques pour l'étude paramétrique

D'un point de vue général, il semble évident que l'ensemble 3×3 est à même de prélever efficacement de l'énergie au système. Cette capacité se manifeste par une amplitude des vagues fortement amoindrie dans la partie aval de la zone de végétation (zone de présence des poteaux) par rapport à la partie aval, comme en atteste la FIGURE 29.

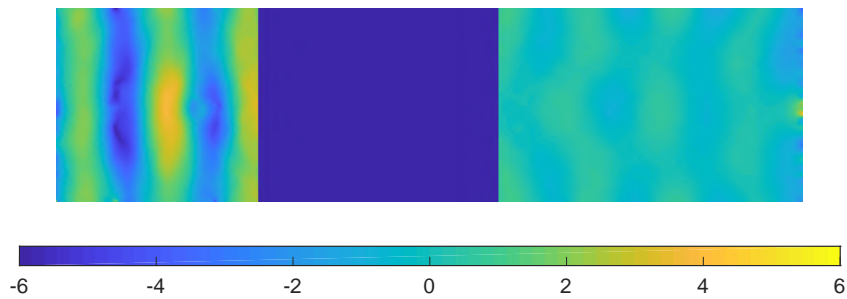


FIGURE 29 – Exemple de relevé (en mm) réalisé avec la méthode SSI pour une matrice régulière 3×3 ($l = 7.2\text{cm}$, $d = 4.8\text{cm}$, $h = 11\text{cm}$, $f = 4.02\text{Hz}$). La zone bleu foncé représente l'espace de "végétation". Taille de la fenêtre de visualisation : 79×22cm.

De même, la FIGURE 30 illustre bien le fait que les poteaux des colonnes les plus en aval subissent des oscillations amoindries et sont protégés par les colonnes précédentes. La photographie est une moyenne temporelle réalisée sur un film de 4s pris par la caméra supérieure : si les poteaux dont le sommet est net on peu oscillé (3ème ligne), ceux de la première ligne sont à l'évidence plus flous, témoignant d'une amplitude d'oscillation importante.

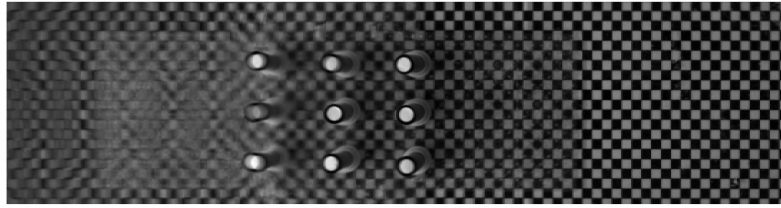


FIGURE 30 – Moyenne temporelle pour une acquisition vidéo de 4s ($l = 7.2\text{cm}$, $d = 4.8\text{cm}$, $h = 11\text{cm}$, $f = 4.02\text{Hz}$)

Configurations géométriques testées Une configuration partiellement immergée est choisie pour maximiser les interactions entre l'onde de surface et les poteaux élastiques. Avec une profondeur d'eau au repos $h = 11\text{cm}$ gardée fixe pour toutes les expériences, le ratio de submersion est $h_p/h = 1.27$, où h_p est la hauteur d'un poteau. La fréquence temporelle pour les vagues est fixée à $f = 3.82\text{Hz}$, assurant une proximité avec la fréquence propre naturelle de résonance des poteaux (voir FIGURE 15, tous les poteaux testés sont de module d'Young $E = 0.88\text{MPa}$) : la longueur d'onde est alors de $\lambda = 11.9\text{cm}$. La hauteur des vagues incidentes est d'environ 10mm juste après le batteur dans ces conditions expérimentales.

Les poteaux sont fixés sur une base Lego, permettant un espacement graduel par pas de 8mm. Tous les espacements possibles sont testés :

- pour $l \in [2.4, 12.8]\text{cm}$, pour $d = 5.6\text{cm}$ (fixe)
- pour $d \in [2.4, 8.0]\text{cm}$, pour $l = 6.4\text{cm}$ (fixe)
- concernant les variations de l , les configurations "régulière" et "en quinconce" sont également testées (voir FIGURE 28)

Par ailleurs, les variations choisies pour d permettent de conserver une distance entre les bords de structures et les bords de la cuve δ suffisante pour que restent négligeables les ondes transverses et effets de bord potentiels ($\delta > d$ dans toutes les configurations).

Résultats : énergie des vagues et des poteaux en fonction de l Pour obtenir l'organisation géométrique optimale pour 3×3 poteaux, les coefficients de réflexion K_r et de transmission K_t ainsi que l'énergie élastique des poteaux sont relevées dans une série d'expériences dans la cuve. Le déroulement d'une expérience est typiquement le suivant :

- Le batteur à vagues est activé pendant une durée de 15s, suffisante pour atteindre un régime permanent de l'écoulement
- La caméra supérieure enregistre ensuite des images pendant 3s, ce qui permet d'enregistrer 10 périodes de l'onde incidente au moins. La zone d'acquisition mesure environ $80 \times 30\text{cm}$, assurant d'enregistrer plusieurs périodes spatiales en amont et en aval de la zone de végétation.
- L'ensemble du dispositif est ensuite interrompu et un temps suffisant de repos est laissé au système pour que les conditions initiales soient comparables entre expériences successives ($\approx 30\text{s}$)
- Pendant ce temps, le traitement des images est immédiatement réalisé sur un ordinateur, pour obtenir K_r , K_t et l'énergie élastique des poteaux (algorithmes SSI et de tracking)

Pour chacune des différentes configurations détaillées précédemment, 12 expériences sont faites, pour valider la répétabilité des résultats et quantifier leur dispersion. Un total de 1400 expériences environ sont donc représentées dans les graphiques qui suivent.

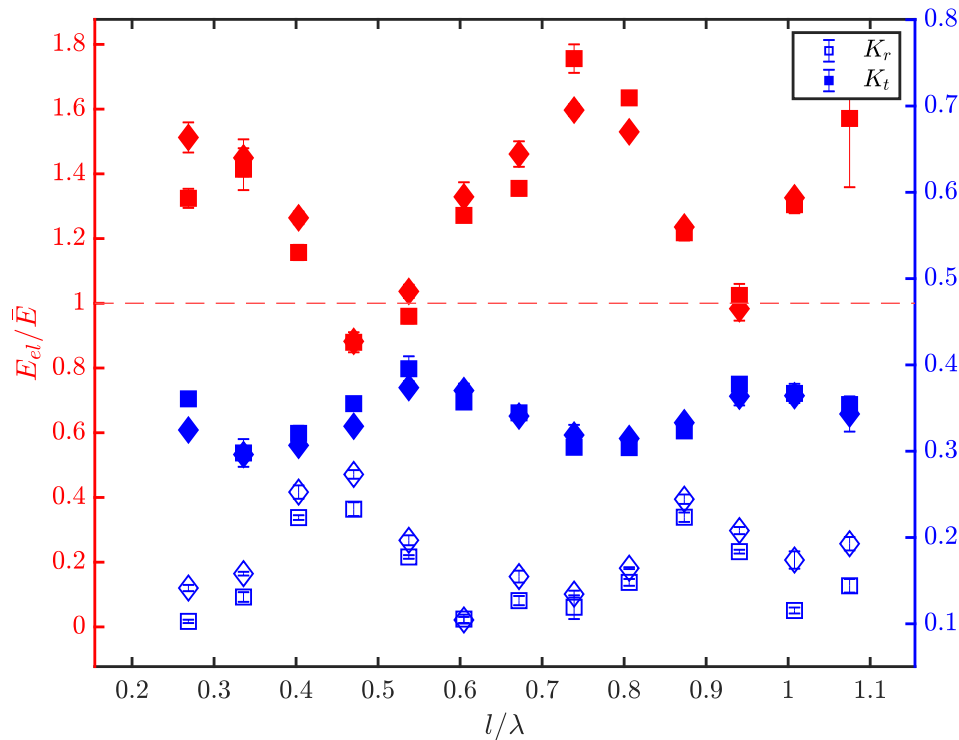


FIGURE 31 – Résultats expérimentaux en fonction de l/λ ($\lambda = 11.9\text{cm}$) pour un structure de poteaux $E = 0.88\text{MPa}$ disposés en 3×3 ($d = 4.8\text{cm}$, $h = 11\text{cm}$, $f = 3.82\text{Hz}$). En bleu : coefficients de réflexion et de transmission. En rouge : Énergie élastique moyenne des 9 poteaux, normalisée par l'énergie d'un poteau seul \bar{E} qui serait placé au niveau de la colonne centrale. (■) pour une structure régulière, (◆) pour une structure en quinconce.

Les résultats montrent une influence claire de la distance longitudinale entre poteaux l . Les variations des grandeurs mesurées apparaissent périodiques, quoique de période différente pour chacune d'elles. Les extréma locaux pour l'énergie sont localisés à des fractions de la longueur d'onde λ (minima à $l = \lambda/2$ et $l = \lambda$, maxima à $l = \lambda/4$ et $l = 3\lambda/4$). Par ailleurs, il est remarquable que l'énergie normalisée soit tantôt supérieure à 1, tantôt inférieure : cela montre de manière convaincante qu'il est utile de rechercher une configuration qui soit optimale, puisque certaines d'entre elles assurent une efficacité énergétique clairement supérieure à un ensemble de poteaux qui seraient isolés. En revanche, aucune différence notable n'apparaît pour la distinction entre les organisations régulière ou en quinconce. Enfin, la faible dispersion des résultats (les barres d'erreur de la FIGURE 31 représentent l'écart-type pour les 12 expériences compilées pour chaque point) permettent d'avoir une bonne confiance dans la validité statistique des résultats.

Le tendances observées pour les variations du coefficient de réflexion peuvent être expliquées à l'aide d'un modèle s'appuyant sur la loi de Bragg, habituellement utilisée pour la réflexion

d'ondes électromagnétiques par des solides cristallins. Cette dernière précise que, pour une onde d'angle d'incidence θ et de longueur d'onde λ frappant un solide modélisé par une succession de plans cristallographiques (dans notre cas, les colonnes de poteaux), les interférences constructives et destructives se produisent pour une séparation entre plan l vérifiant :

$$2l \sin(\theta) = n\lambda$$

où n est un entier naturel. En effet, dans ce cas, les ondes réfléchies sont parfaitement en phase avec l'onde incidente, produisant une onde résultant d'amplitude importante. Dans notre cas, $\theta = \pi/2$, on obtient donc $l = n\lambda/2$.

On observe effectivement des maxima situés proches de $l = \lambda/2$ et de $l = \lambda$ pour la courbe décrivant les variations de K_r .

Dans la courbe suivante (FIGURE 32), on somme les coefficients K_r et K_t pour obtenir les points en noir.

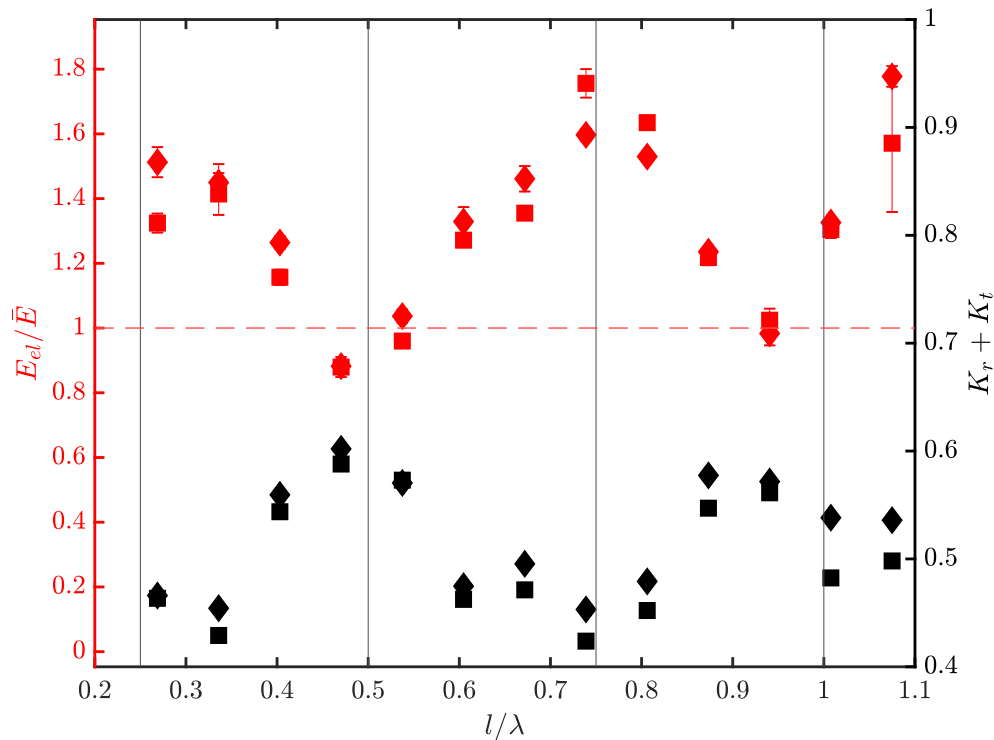


FIGURE 32 – Résultats expérimentaux en fonction de l/λ ($\lambda = 11.9\text{cm}$) pour un structure de poteaux $E = 0.88\text{MPa}$ disposés en 3×3 ($h = 11\text{cm}$, $f = 3.82\text{Hz}$). En noir : somme des coefficients de réflexion et de transmission. En rouge : Énergie élastique moyenne des 9 poteaux, normalisée par l'énergie d'un poteau seul \bar{E} qui serait placé au niveau de la colonne centrale. (■) pour une structure régulière, (◆) pour une structure en quinconce.

On observe ici plus clairement une tendance en claire opposition entre l'énergie élastique des poteaux et l'énergie de l'onde. Ces variations sont explicables puisqu'il est logique que l'énergie dissipée soit maximale lorsque peu d'énergie de l'onde est transmise ou réfléchi par le système,

et inversement. Les extrema locaux sont ici précisément localisé aux fractions de $\lambda/4$, comme le montrent les guides visuels verticaux ajoutés au graphique.

Il est également intéressant de détailler le comportement de la structure à l'échelle de la colonne. On peut pour cela calculer la moyenne des énergie élastique de poteaux non pas pour les 9 poteaux, mais pour chaque colonne (1 en amont, 2 au centre, 3 en aval). Ces données sont représentées en FIGURE 33.

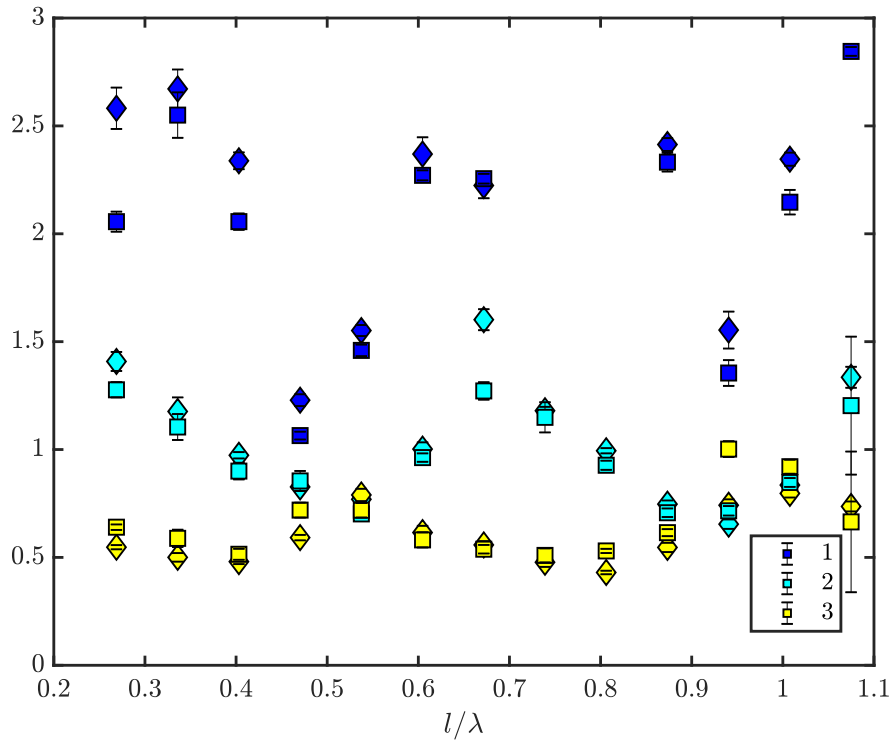


FIGURE 33 – Énergie moyenne normalisée E_{el}/\bar{E} de chaque colonne en fonction de l/λ , pour un structure de poteaux $E = 0.88\text{MPa}$ disposés en 3×3 ($h = 11\text{cm}$, $f = 3.82\text{Hz}$). 1 correspond à la colonne la plus en amont, 3 à la plus en aval. (■) pour une structure régulière, (◆) pour une structure en quinconce.

On remarque là encore des variations en fonction de l pour chaque colonne, d'autant plus importantes que la colonne est proche du batteur. On observe cependant que les sens de variation sont les mêmes pour les colonnes 1 et 2, là où la troisième colonne suit une tendance en opposition de phase. Ce comportement ne correspond pas à la théorie établie par Nové-Josserand [2018] pour la modélisation des oscillations, selon laquelle les colonnes 1 et 3 devraient suivre des tendances identiques. Il est également notable que la troisième ligne voit son mouvement largement atténué par la présence des deux précédente, puisque la valeur de E_{el}/\bar{E} ne dépasse 1 dans aucune configuration.

Influence de d/λ On analyse ensuite la rôle du paramètre d sur les coefficients K_r , K_i et l'énergie élastique des poteaux. Les graphiques suivants (FIGURES 34 et 35) présentent les données de la

même manière que pour les variations en fonction de l .

On constate que les extrema sont ici localisés à des valeurs différentes, qui ne sont plus des multiples de $\lambda/4$. On a également pour les premiers points (d petit) un coefficient de transmission particulièrement faible : cela s'explique par un effet de "mur", l'onde étant quasi-entièrement stoppée lorsque les poteaux sont très proches. En effet, pour le premier point, ils sont placés à une distance $d = 3.2\text{cm}$ alors que leur diamètre est de $D = 1.6\text{cm}$.

Pour la figure suivante (FIGURE 35), on somme encore une fois les coefficients K_r et K_t comme précédemment. Le comportement obtenu est toujours une opposition dans les tendances d'évolution entre l'énergie moyenne des poteaux et la somme $K_r + K_t$. On peut également remarquer que la plage des valeurs dans laquelle évolue cette somme est comparable à celle observée pour les variations en fonction de l (entre 0.4 et 0.6 environ). Cette observation va dans le sens d'un rôle équivalent ou comparable pour d et l en ce qui concerne la répartition de l'énergie du système. Pour l'influence de d , la configuration en quinconce n'a pas été testée car elle n'affectait pas les mesures dans les expériences décrites précédemment.

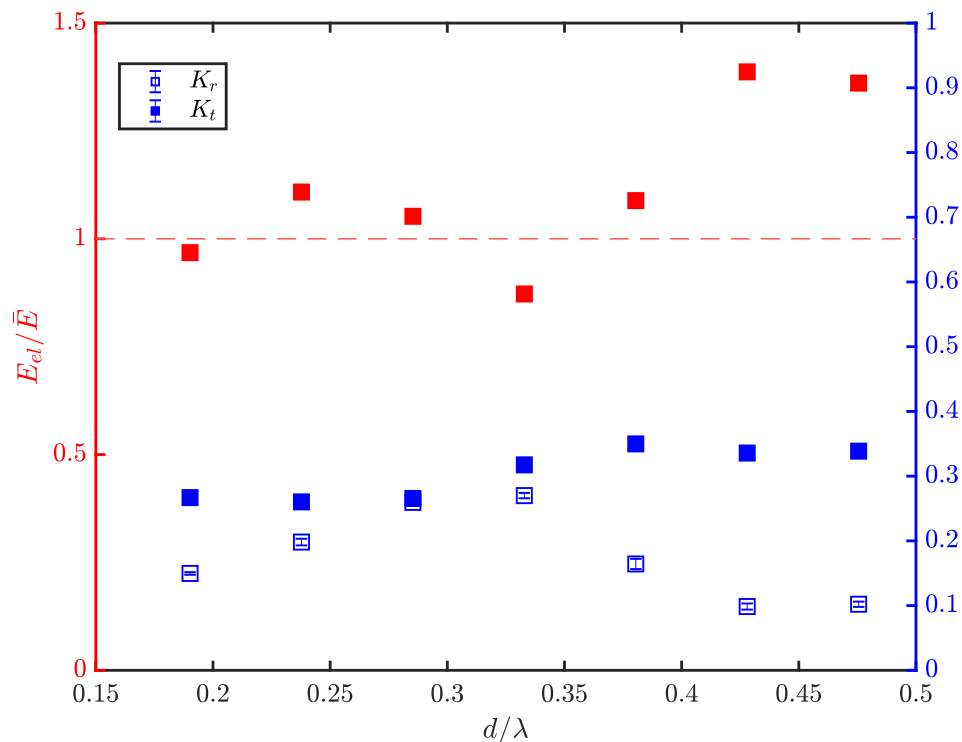


FIGURE 34 – Résultats expérimentaux en fonction de d/λ ($\lambda = 11.9\text{cm}$) pour un structure de poteaux $E = 0.88\text{MPa}$ disposés en 3×3 (matrice régulière, $l = 5.6\text{cm}$, $h = 11\text{cm}$, $f = 3.82\text{Hz}$). En bleu : coefficients de réflexion et de transmission. En rouge : énergie élastique moyenne des 9 poteaux, normalisée par l'énergie d'un poteau seul \bar{E} qui serait placé au niveau de la colonne centrale.

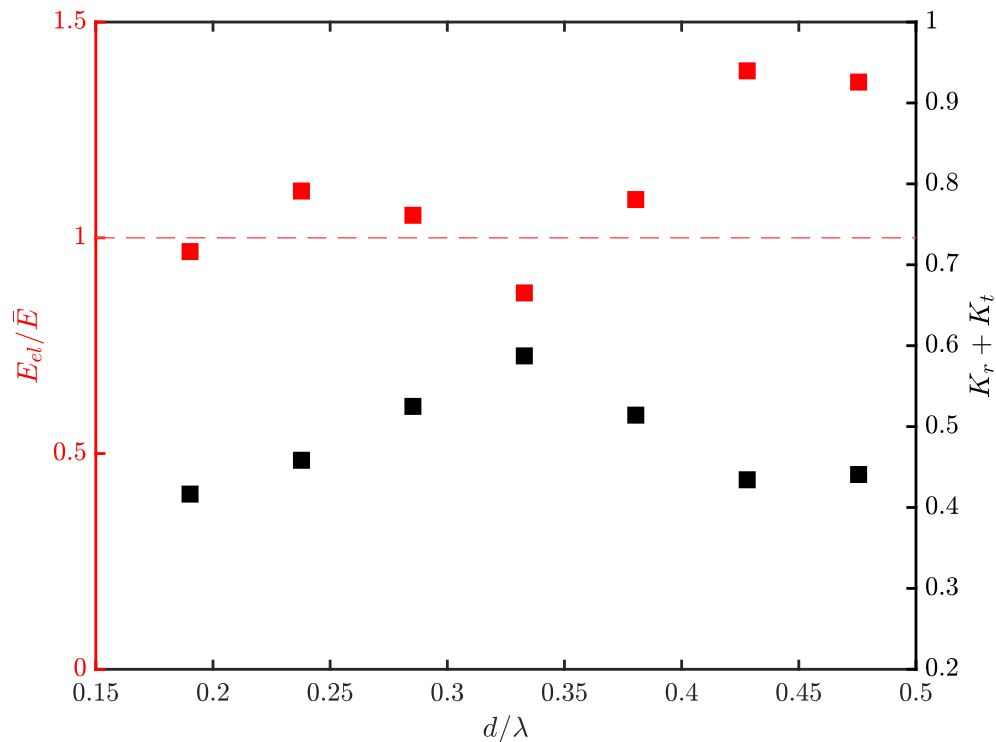


FIGURE 35 – Résultats expérimentaux en fonction de d/λ ($\lambda = 11.9\text{cm}$) pour un structure de poteaux $E = 0.88\text{MPa}$ disposés en 3×3 (matrice régulière, $h = 11\text{cm}$, $f = 3.82\text{Hz}$). En noir : somme des coefficients de réflexion et de transmission. En rouge : énergie élastique moyenne des 9 poteaux, normalisée par l'énergie d'un poteau seul \bar{E} qui serait placé au niveau de la colonne centrale.

3.3 Onde induite ré-émission par les poteaux

Nous avons constaté, au travers de l'analyse de l'influence de l et d sur la répartition de l'énergie au sein de notre "végétation", que l'organisation géométrique avait un rôle fort à la fois sur la capacité de la structure à dissiper élastiquement de l'énergie et à réfléchir ou transmettre les vagues. Cette organisation géométrique peut ainsi rendre le système beaucoup plus efficace énergétiquement que ne le serait un ensemble "isolé" de poteaux. Cette observation atteste de l'existence d'une forme d'interaction entre poteaux, qu'il est intéressant de pouvoir observer voire quantifier.

Afin de comprendre les comportements mécaniques qui président aux variations décrites précédemment, nous revenons donc à l'échelle de l'interaction entre quelques poteaux. L'objectif est de mesurer plus en détail l'onde de surface à proximité de ces derniers, afin de comprendre si cette dernière influe sur la capacité des poteaux à interagir entre eux.

Cette analyse est rendue possible par une exploitation plus poussée des images initialement acquises par la caméra surplombante. Sur la plupart des cartes d'élévation produites par l'algorithme

SSI, une légère perturbation, de longueur d'onde faible, est visible à l'oeil nue, témoignant de la présence des poteaux (voir par exemple la mesure reproduite en FIGURE 22). Un post-processing d'image via un algorithme de Fast Fourier Transform (FFT) en 2D est donc réalisé avec MATLAB : l'objectif consiste à isoler les vecteurs d'onde dans la direction x ayant un faible module (donc correspondant aux longueurs d'onde élevées), qui décrivent *a priori* l'onde principale produite par le batteur. En supprimant ces vecteurs d'onde particuliers de la transformée de Fourier en deux dimensions, puis en réalisant une transformée inverse, on voit effectivement apparaître une onde induite, émise par le poteaux soumis aux vagues lors de son oscillation. Ces mesures ne sont cependant pas suffisamment propres pour être exploitées de manière systématique, aucune étude paramétrique n'a donc été faite dans ce cadre. Des exemples sont reproduits dans les FIGURES 36 et 38.

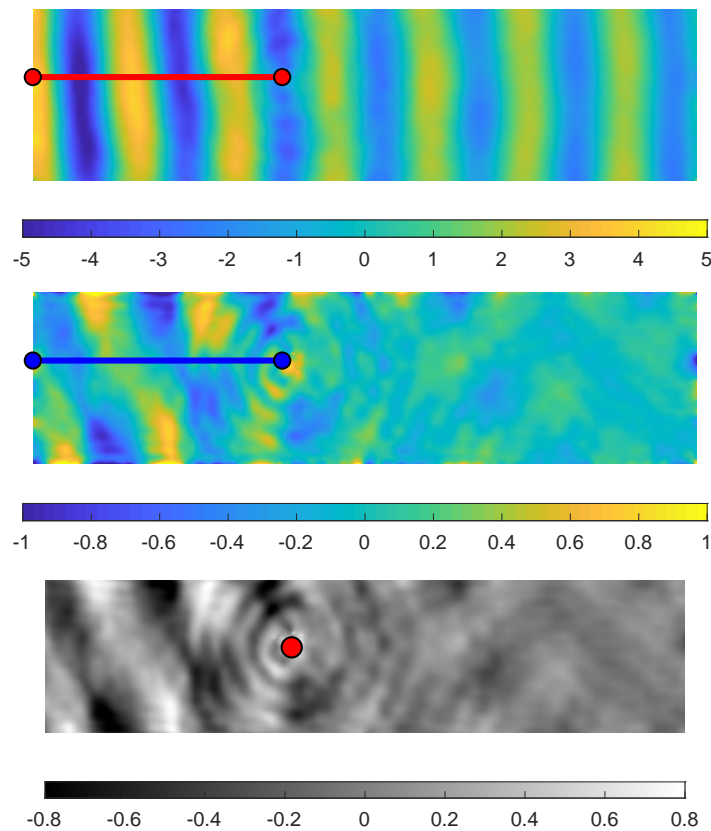


FIGURE 36 – Haut : carte d'élévation de la surface libre résultant de l'algorithme SSI, pour un poteau seul ($E = 0.88\text{MPa}$) soumis à des vagues de fréquence $f = 4.02\text{Hz}$ ($h = 11\text{cm}$)
Milieu : Transformée de Fourier 2D inversée, après retrait des vecteurs d'onde dans la direction longitudinale x
Bas : Visualisation identique à celle du milieu, en nuance de gris pour faciliter la lecture de l'image. Le point rouge localise le poteau.
Les lignes de couleurs correspondent aux courbes tracées en FIGURE 37 (colorbar en mm, taille de la fenêtre de visualisation : $79 \times 22\text{cm}$)

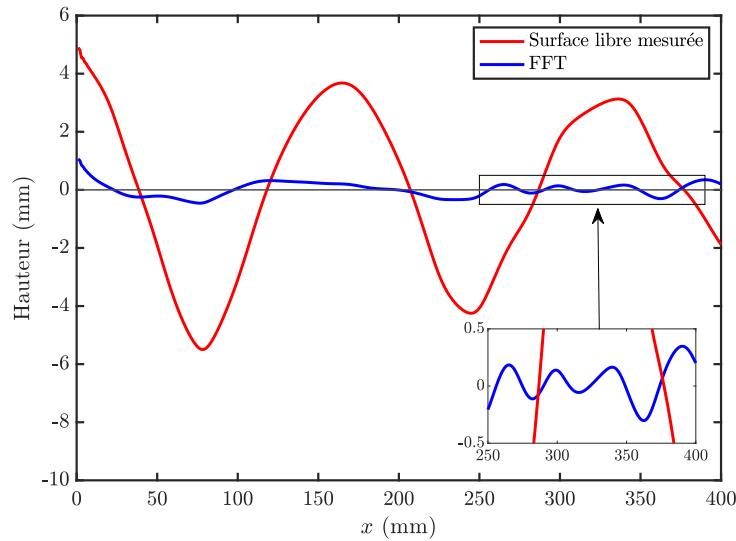


FIGURE 37 – Comparaison des amplitudes de vagues en fonction de la direction longitudinale x entre la mesure initiale via l’algorithme SSI et la mesure post-traitée par FFT en 2D.

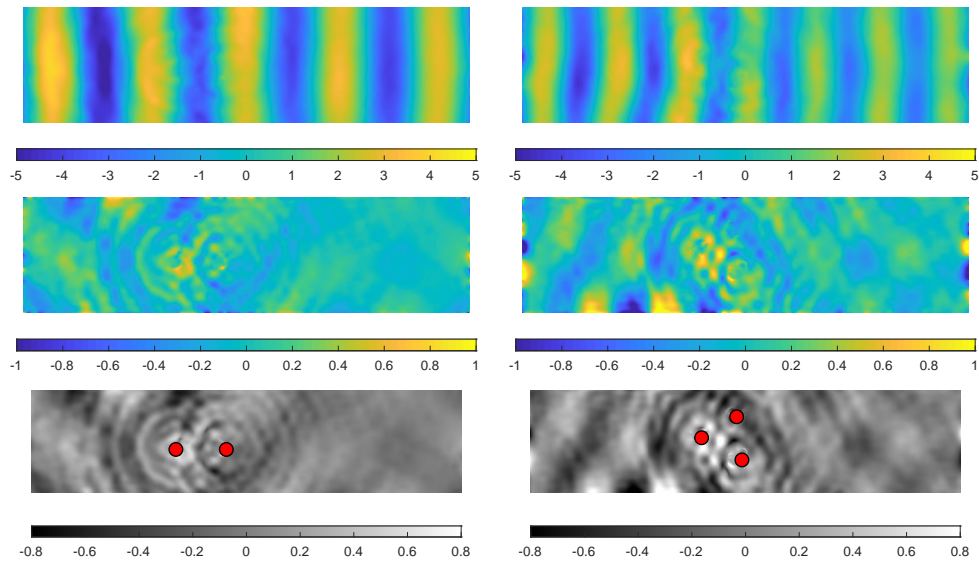


FIGURE 38 – Haut : carte d’élévation de la surface libre résultant de l’algorithme SSI, pour 2 et 3 poteaux ($E = 0.88\text{MPa}$) soumis à des vagues de fréquence $f = 4.02\text{Hz}$ ($h = 11\text{cm}$), séparés d’une longueur $l = 5.6\text{cm}$. Milieu : Transformée de Fourier 2D inversée, après retrait des vecteurs d’onde dans la direction longitudinale x . Bas : Visualisation identique à celle du milieu, en nuance de gris pour faciliter la lecture de l’image. Les points rouges localisent les poteaux (colorbar en mm, taille de la fenêtre de visualisation : $79 \times 22\text{cm}$)

4. Conclusions et perspectives

Dans ce rapport, nous avons exploré expérimentalement et à échelle réduite les interactions houle-structure, pour un système modèle de poteaux cylindriques fixés au fond de l'eau, inspiré du comportement des algues. L'expérience-type réalisée consiste à soumettre un ensemble de ces poteaux à des vagues, et à mesurer la répartition d'énergie au sein du système (énergie des vagues réfléchie ou transmise, énergie élastique dissipée par déformation des cylindres). L'influence des paramètres spatiaux est observée dans le détail, dans le but d'obtenir une organisation optimale, c'est-à-dire dissipant le plus possible d'énergie par déformation et atténuant efficacement les vagues, dans un double objectif de récupération d'énergie et de protection du littoral.

4.1 Organisation optimale des poteaux

Les expériences sont menées pour la plupart sur un ensemble de 9 poteaux disposés en 3 lignes et 3 colonnes : la distance longitudinale l et transversale d entre les poteaux sont les paramètres d'ajustement pour trouver une répartition optimale. Des répartitions régulières et en quinconce sont également comparées. Pour tous les tests, on relève une diminution d'énergie entre 60 et 70% environ pour l'onde lorsqu'elle passe à travers la "végétation", et environ 10 à 30% de son énergie est réfléchie ; toutes les configurations sont donc efficaces pour protéger le littoral dans une certaine mesure.

On observe pourtant des variations clairement identifiables de cette répartition de l'énergie, périodiques en fonction de l et d , mais de périodes différentes

- pour les variations en fonction de l : les minima d'énergie des poteaux sont précisément localisés pour des valeurs de l égales à des multiples de $\lambda/2$. Ces points sont également des maxima pour la somme de l'énergie réfléchie et transmise.
- pour les variations en fonction de d : les minima d'énergie des poteaux interviennent pour $d \approx 0.35\lambda$. Cette tendance se retrouve là encore en opposé pour l'évolution de la somme des coefficients de réflexion et de transmission.
- dans tous les cas, l'organisation des poteaux en quinconce plutôt que de manière régulière ne semble pas avoir d'influence sur la répartition de l'énergie du système.

On peut également observer que les poteaux soumis aux vagues ré-émettent une onde dans la direction radiale au cours de leur mouvement d'oscillation. Cette onde induite peut être mise en évidence de manière expérimentale et semble avoir un rôle dans les comportements observés. En effet l'énergie moyenne d'un ensemble de 9 poteaux est comparée à celle qu'aurait un poteau isolé : selon les configurations géométriques, elle peut être supérieure ou inférieure, avec des variations très importantes, de l'ordre de 80%. Il doit donc exister une forme d'interaction entre poteaux, faisant apparaître un comportement nouveau en raison du groupement de plusieurs unités.

Le fait que cette onde soit radiale (voir FIGURE 36), et donc que son effet soit le même dans toutes les directions de l'espace, explique que des comportements rôles similaires soient mesurés pour d et l , qui sont des grandeurs ne présentant pas de différence de nature, si ce n'est qu'elle décrivent des distances dans des directions différentes et orthogonales. Pourtant, cette hypothèse d'une interaction isotrope semble contredite par le fait que l'organisation en quinconce n'a aucune influence sur les grandeurs relevées. Comprendre en profondeur l'influence de ces éléments nécessitera d'autres expériences, en modifiant par exemple les fréquences de travail et en testant

des configurations ou les poteaux sont placés de manière aléatoire.

Finalement, d'un point de vue applicatif, une séparation longitudinale $l = 3\lambda/4$ entre poteaux semble expérimentalement être la plus efficace : elle transmet seulement 30% de l'énergie de l'onde incidente, et l'énergie moyenne dissipée élastiquement par déformation est 80% plus importante que pour un poteau isolé.

4.2 Perspectives expérimentales et limites de l'étude

L'énergie est mesurée en unité arbitraire et est normalisée par l'énergie d'un poteau seul pendant toute l'étude. Les valeurs ne sont donc pas comparables aux coefficients de transmission et de réflexion de l'onde, même si confronter leurs variations reste pertinent. Il serait intéressant de rapprocher cette énergie élastique de l'énergie totale de l'onde de surface créée par le batteur à vagues, afin de pouvoir réaliser de véritables bilan d'énergie : cela permettrait notamment d'identifier la part d'énergie dissipée directement dans le fluide, pour laquelle nous n'avions pour l'instant aucun outil de mesure.

En outre, une cuve plus grande et avec plus de profondeur aurait pour conséquence une dissipation naturelle moindre, et peut-être des relevés plus "propres" et répétables qui rendraient possibles une exploitation plus systématique des mesures d'onde induite par les poteaux.

Une perspective naturelle de ces travaux serait d'augmenter le nombre de poteaux afin d'analyser sur le comportement observé ici sur une "cellule de base" 3×3 reste valide pour de plus grandes assemblées de poteaux. De rares tests ont été réalisés, faute de temps (voir FIGURE 39).

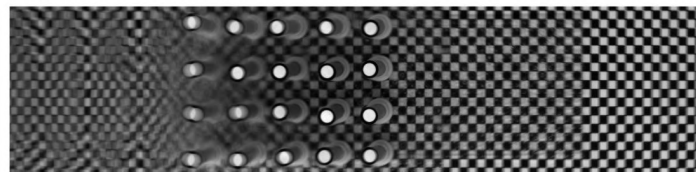


FIGURE 39 – Moyenne temporelle d'une acquisition vidéo de 4s pour une répartition de poteaux 5×4 avec une fréquence de vagues $f = 4.02\text{Hz}$. Zone d'acquisition : $79 \times 22\text{cm}$

Enfin, comme évoqué précédemment, tester dans plusieurs cas des configurations aléatoires de poteaux serait utile pour approfondir les résultats déjà obtenus. Quelques essais de ce type ont été également réalisés (voir FIGURE 40). Ces mesures présentaient des valeurs d'énergies moyennes équivalentes à celle d'un poteau isolé : cela semble signifier que l'interaction entre poteaux est annulée lorsque l'organisation spatiale de ces derniers est choisie de manière arbitraire.

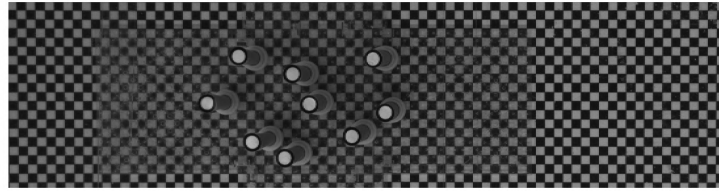


FIGURE 40 – Exemple de répartition aléatoire pour 9 poteaux

4.3 Utilisation de matériaux piézo-électriques

Une dernière piste potentielle de poursuite et d'approfondissement du travail décrit précédemment consisterait à mesurer directement l'énergie élastique dissipée au cours du temps lors des expériences, à l'aide de matériaux piézo-électriques, placés sur les poteaux et subissant les mêmes déformations. De nombreuses difficultés devraient être cependant élucidées, en particulier la question de l'étanchéité du piézo-électrique, ou de la manière de le rendre solidaire du poteau : il a été envisagé de le couler directement dans la pâte silicone constitutive des poteaux, mais cela risquerait de le rendre inutilisable. Quelques tests ont été faits avec de la feuille piézo-électrique métallisée NiCu (voir FIGURE 42), mais se sont révélés non-concluants, en raison de la fragilité du matériau piézo, de la difficulté rencontrée à le lier proprement à un poteau et de la relative méconnaissance de l'expérimentateur en la matière.

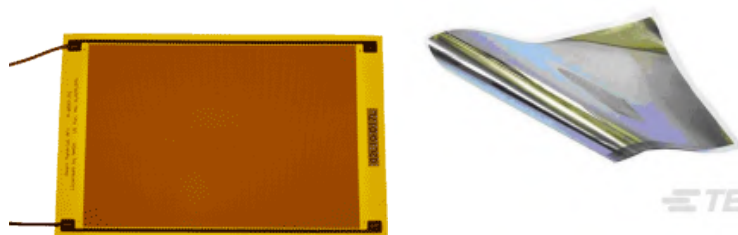


FIGURE 41 – Gauche : lame piézo-électrique MFC Smart Material. Droite : Feuille piézo-électrique souple métallisée.



FIGURE 42 – Test (peu fructueux) d'installation d'une feuille piézo-électrique métallisée NiCu sur un poteau flexible.

Par ailleurs, un obstacle supplémentaire à surmonter pour l'utilisation des piézo-électriques est leur fréquence de résonance élevée, qui ne correspond pas à celles des poteaux utilisés ici, ni à celles pouvant être mises en oeuvre dans la cuve, avec le dispositif expérimental en l'état.

5. Annexes

5.1 Énergie élastique d'un poteau

On cherche ici à quantifier, par un modèle de poutre élastique isotrope simple, l'énergie élastique emmagasinée par un poteau dont la flèche est connue (déflexion du sommet du poteau mesurée par la caméra surplombante).

On peut modéliser ce dernier par une poutre console (encastrée à une extrémité et libre à l'autre), soumise à une contrainte répartie linéairement. Cette contrainte est considérée comme minimum à la base encastrée et maximum à l'extrémité libre, pour rendre compte le plus fidèlement possible des efforts appliqués par les vagues : en effet, l'amplitude de déplacement du fluide est en théorie maximale à la surface et nulle dans le fond de la cuve. Ces hypothèses sont reprises sur la FIGURE 43.

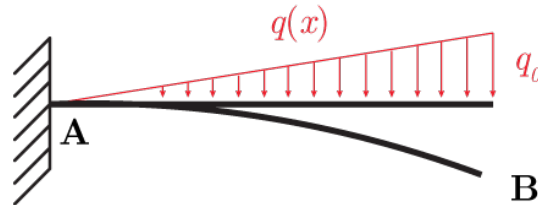


FIGURE 43 – Modèle de poutre console étudié pour la modélisation des poteaux élastiques

Pour simplifier la modélisation, on adoptera également l'hypothèse de Bernoulli, selon laquelle au cours de la déformation, les sections droites de la poutre restent perpendiculaires à la courbe moyenne : cela permet de négliger les contraintes de cisaillement transmises dans la structure dans le cadre de la flexion. On parle d'une situation de flexion pure.

En notant x l'abscisse curviligne le long de la poutre et q la contrainte linéique à laquelle elle est soumise, telle que $q(x) = \frac{q_0}{L}x$, on a

$$\mathcal{M}_A = - \int_0^L \frac{q_0}{L} x^2 dx = - \frac{q_0 L^2}{3} \quad (9)$$

En appliquant l'équation d'équilibre classique de la théorie des poutres élastiques, il vient

$$\frac{d^2 \mathcal{M}}{dx^2} + q = 0 \quad (10)$$

Sachant que $\mathcal{M}(0) = \mathcal{M}_A = -\frac{q_0 L^2}{3}$ et que $\mathcal{M}(L) = 0$, on obtient finalement,

$$\mathcal{M}(x) = - \frac{q_0}{6L} (x^3 - 3L^2 x + 2L^3). \quad (11)$$

On peut ensuite calculer l'énergie élastique \mathcal{E} totale stockée par la formule

$$\mathcal{E} = \int_0^L \frac{\mathcal{M}^2}{2EI} dx \quad (12)$$

$$= \frac{q_0^2}{72L^2EI} \int_0^L (x^3 - 3L^2x + 2L^3)^2 dx \quad (13)$$

$$= \frac{11}{840} \frac{q_0^2}{EI} L^5 \quad (14)$$

De plus, la formule de la flèche pour le cas de chargement choisi donne une flèche au point B , f_B vérifiant

$$f_B = \frac{11}{120} \frac{q_0}{EI} L^4 \quad (15)$$

En substituant (15) dans (14) on obtient finalement

$$\mathcal{E} = \frac{120}{77} \frac{EI}{L^3} f_B^2 \quad (16)$$

5.2 Plans des bases de poteaux

Les bases adoptées pour lier les poteaux au fond de la cuve sont dessinées grâce au logiciel CATIA et imprimée en 3D en plastique ABS.

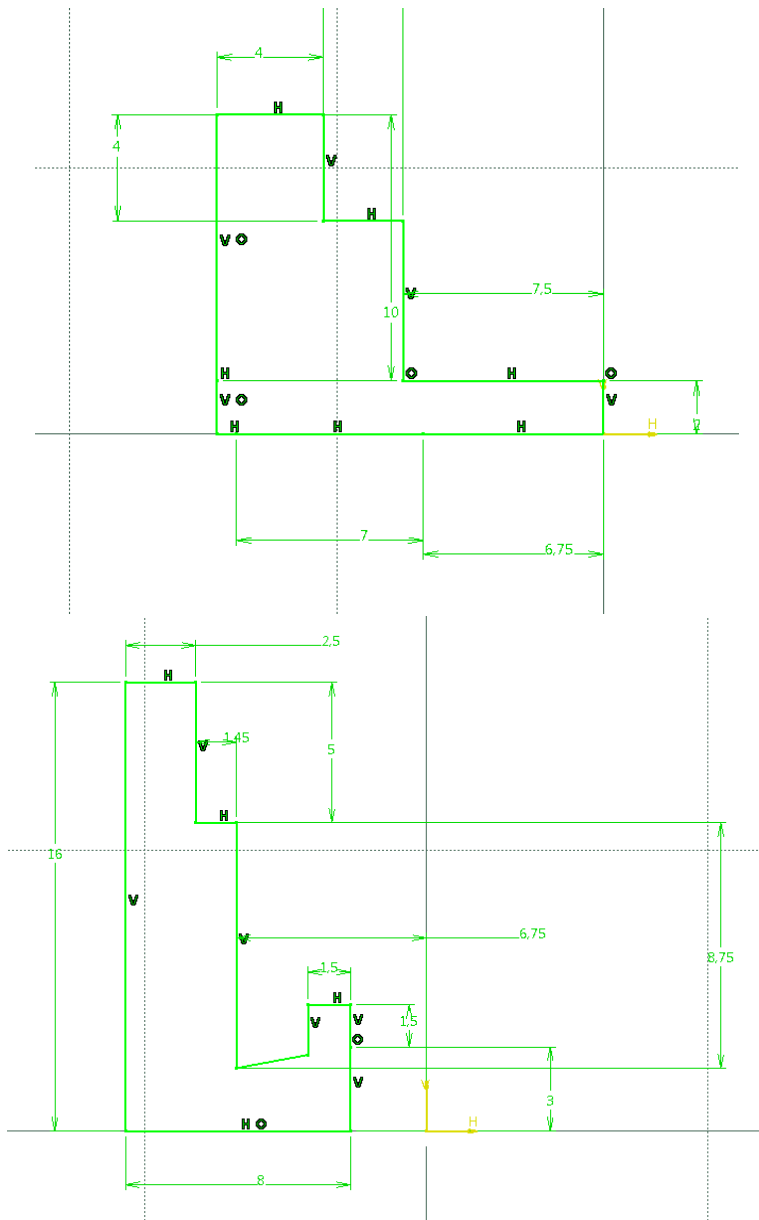


FIGURE 44 – Vues en coupe des deux parties indépendantes des bases réalisées en impression 3D. Les solides sont des révolutions de ces plans autour de l'axe V représenté.

Références

- J. Abanades, D. Greaves, and G. Iglesias. Wave farm impact on the beach profile : A case study. *Coastal Engineering*, 86 :36–44, 2014. ISSN 03783839. doi : 10.1016/j.coastaleng.2014.01.008. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2014.01.008>. 13
- J. Abanades, G. Flor-Blanco, G. Flor, and G. Iglesias. Dual wave farms for energy production and coastal protection. *Ocean and Coastal Management*, 160(December 2017) :18–29, 2018. ISSN 09645691. doi : 10.1016/j.ocecoaman.2018.03.038. URL <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.03.038>. 5, 12, 13
- BP. 67 th edition Contents is one of the most widely respected. *Statistical Review of World Energy*, pages 1–56, 2018. ISSN 0300-3604. 9
- A H Day, A Babarit, A Fontaine, Y He, M Kraskowski, M Murai, I Penesis, F Salvatore, and H Shin. Hydrodynamic modelling of marine renewable energy devices : A state of the art review. 108 : 46–69, 2015. doi : 10.1016/j.oceaneng.2015.05.036. 5, 10
- Johannes Falnes. A review of wave-energy extraction. *Marine Structures*, 20(4) :185–201, 2007. ISSN 09518339. doi : 10.1016/j.marstruc.2007.09.001. 10
- Duncan Fitzgerald, Michael S Fenster, Brittna A Argow, and Ilya V Buynevich. Coastal Impacts Due to Sea-Level Rise. (April 2018), 2008. doi : 10.1146/annurev.earth.35.031306.140139. 12
- Mark S. Fonseca and Jennifer A. Cahalan. A preliminary evaluation of wave attenuation by four species of seagrass. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1992. ISSN 02727714. doi : 10.1016/S0272-7714(05)80039-3. 13
- Kester Gunn and Clym Stock-Williams. Quantifying the global wave power resource. *Renewable Energy*, 44 :296–304, 2012. ISSN 09601481. doi : 10.1016/j.renene.2012.01.101. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2012.01.101>. 9
- Abdulrahman Jbaily and Ronald W Yeung. Piezoelectric devices for ocean energy : a brief survey. 1(April 2013) :101–118, 2015. doi : 10.1007/s40722-014-0008-9. 10
- Tristan Leclercq and Emmanuel De Langre. Reconfiguration of elastic blades in oscillatory flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 838 :606–630, 2018. ISSN 14697645. doi : 10.1017/jfm.2017.910. 22
- Christophe Mcglade and Paul Ekins. The geographical distribution of fossil fuels unused when limiting global warming to 2 °C. *Nature*, 517(7533) :187–190, 2014. ISSN 0028-0836. doi : 10.1038/nature14016. URL <http://dx.doi.org/10.1038/nature14016>. 9
- Frédéric Moisy, Marc Rabaud, and Kévin Salsac. A synthetic Schlieren method for the measurement of the topography of a liquid interface. *Experiments in Fluids*, 46(6) :1021–1036, 2009. ISSN 07234864. doi : 10.1007/s00348-008-0608-z. 26
- Clotilde Nové-Josserand. Converting wave energy from fluid-elasticity interactions. (Ed 564), 2018. 14, 32, 39
- Y. Ouellet and I. Datta. A survey of wave absorbers Revue des amortisseurs à houle. *Journal of Hydraulic Research*, 24(4) :265–280, 1986. ISSN 00221686. doi : 10.1080/00221688609499305. 21, 22

- José Francisco Sánchez-González, Virginia Sánchez-Rojas, and Constantine Demetrius Memos. Wave attenuation due to *Posidonia oceanica* meadows. *Journal of Hydraulic Research*, 49(4) : 503–514, 2011. ISSN 00221686. doi : 10.1080/00221686.2011.552464. 13
- I O Thorbjörnsson, Thorsteinn Sigfusson, and Gudmundur Gunnarsson. Future prospects of renewable energy production in Iceland Future prospects of renewable energy production in Iceland. (May), 2012. 5, 9
- Sander Wildeman. Real-time quantitative Schlieren imaging by fast Fourier demodulation of a checkered backdrop. *Experiments in Fluids*, 59(6), 2018. ISSN 07234864. doi : 10.1007/s00348-018-2553-9. 6, 26