



## 15<sup>ÈMES</sup> JOURNÉES DE L'HYDRODYNAMIQUE

22 - 24 novembre 2016 - Brest

### **ETUDE NUMERIQUE ET EXPERIMENTALE D'UN SYSTEME DE GENERATION CONJOINTE DE HOULE ET COURANT EN BASSIN UTILISANT DES POMPES AXIALES**

#### *NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF A WAVE AND CURRENT GENERATION SYSTEM USING AXIAL-FLOW PUMPS*

**A. Babarit<sup>(1)</sup>, V. Arnal<sup>(1)</sup>, S. Delvoye<sup>(1)</sup>, J. Wackers<sup>(1)</sup>, L. Davoust<sup>(1)</sup>, F. Bonnefoy<sup>(1)</sup>**

<sup>(1)</sup> Ecole Centrale de Nantes – CNRS, 1 rue de la Noë, 44300 Nantes, France  
Email : [aurelien.babarit@ec-nantes.fr](mailto:aurelien.babarit@ec-nantes.fr)

#### **Résumé**

Un nouveau dispositif pour la génération de houle et courant en bassin d'essai a été imaginé à l'Ecole Centrale De Nantes. Il est principalement constitué de pompes axiales pilotées de manière à générer un écoulement fluctuant. Ces fluctuations se traduisent à la surface libre par la génération de vagues. Pour peu que le débit moyen des fluctuations soit non nul, on peut également obtenir en plus des vagues un courant. Dans cette étude, nous avons exploré les capacités de ce dispositif et l'influence des paramètres géométriques sur la génération de houle et courant à la fois par la simulation numérique et la modélisation expérimentale. Notamment, les études numériques indiquent que le dispositif est particulièrement apte à la génération de vagues longues et de grande amplitude. Le montage expérimental a quant à lui permis de réaliser une preuve de concept pour la génération de houle et courant, incluant le cas de la houle se propageant contre le courant.

#### **Summary**

A new concept for wave and current generation has been invented at Ecole Centrale De Nantes. It consists of axial-flow pumps driven such as to generate an oscillatory flow. Oscillations of the flow lead to the generation of water waves at the free surface. If the average of the flow is different from zero, a current may be generated in addition to the waves. In this study, we explored the capabilities of this concept and the influence of geometric parameters on wave and current generation. We used numerical and experimental modelling. Most noticeably, the numerical results indicate that this concept is well suited for the generation of long and high waves. Using the experimental setup, we made a proof of concept for the wave and current generation, including waves propagating against the current.

# 1. Introduction

Pour générer de la houle en bassin, on utilise habituellement des flotteurs rigides animés d'un mouvement oscillant. La génération de courant est quant à elle obtenue par l'intermédiaire de pompes et de conduites de recirculation passant sous le fond du bassin ou sur un côté. La génération de houle et courant met donc en œuvre deux dispositifs distincts. Cette architecture est notamment mise en œuvre dans les bassins de génie océanique de MARINTEK en Norvège, MARIN aux Pays-Bas, et en France à Ifremer Boulogne ou encore Océanide à la Seyne sur Mer.

Du point de vue du fluide, la génération de vagues résulte de la création par le générateur de houle d'une condition limite oscillante sur l'une des parois du bassin [1]. La propagation de houle étant un phénomène déterministe, tout système permettant de générer le même profil de vitesse conduira à la génération des mêmes vagues. A partir de cette idée, nous avons imaginé un nouveau système de génération de houle mettant en œuvre des pompes axiales à la place de flotteurs rigides [2] (Figure 1). Ces pompes sont pilotées pour forcer un écoulement oscillant entre un réservoir à surface libre et la paroi du bassin. On crée ainsi une condition limite pour le fluide similaire à celle obtenue avec des batteurs à houle traditionnels, ce qui se traduit par la génération de vagues sur la surface libre.

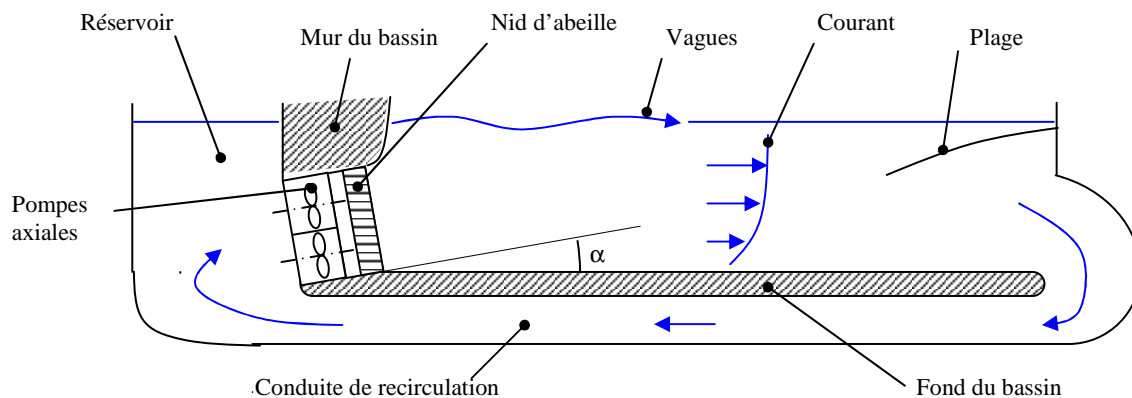


Figure 1: Schéma du système de génération de houle et courant

Un intérêt de ce système est qu'il permet de générer à la fois de la houle et du courant. En effet, la génération de courant s'obtient simplement en pilotant les pompes de manière à imposer un débit moyen non nul. Bien entendu, il est nécessaire dans ce cas de prévoir une conduite de recirculation pour que le fluide puisse revenir du bassin vers le réservoir. Selon le signe du débit moyen, on peut générer des conditions de houle avec ou contre-courant.

Un autre avantage est qu'a priori et contrairement aux batteurs de houle classique, l'amplitude des vagues que l'on peut générer n'est pas limitée par la course du batteur. A titre d'illustration, la figure 2 présente la hauteur de vague maximale que l'on peut générer dans le grand bassin de génie océanique de l'École Centrale de Nantes (ECN) en fonction de la période de la houle. On peut y voir que, au-delà de quatre secondes de période, l'amplitude de la houle est contrainte par la course du batteur. Le dispositif étudié ici n'est pas concerné par cette limite.

Cependant, on peut s'interroger sur la qualité de la houle et du courant générés avec le système décrit ici. En effet, les pompes axiales génèrent de la turbulence et des structures tourbillonnaires. De plus, en l'absence d'un pilotage adéquat du débit, le dispositif risque de générer un taux élevé d'ondes libres.

Il n'est donc pas évident de conclure a priori sur la pertinence ou non de ce nouveau système de génération de houle et courant comme alternative aux dispositifs traditionnels. Pour répondre à cette problématique, des études exploratoires ont été entreprises au laboratoire LHEEA de l'École Centrale de Nantes - CNRS. Dans un premier temps, nous avons réalisé une étude paramétrique s'appuyant sur la simulation numérique afin d'évaluer l'effet des différents paramètres géométriques et dynamiques. Sur la base des résultats de cette étude, nous avons conçu un montage expérimental qui a permis de mesurer les performances du dispositif en conditions réelles, dont notamment le rendement énergétique. Cette communication présente les résultats de ces travaux.

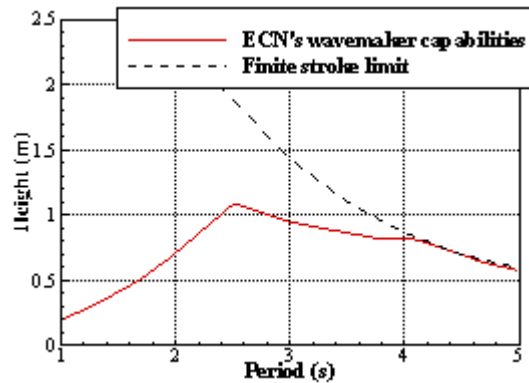


Figure 2: Capacité du batteur de houle du grand bassin de l'Ecole Centrale De Nantes en terme de hauteur de houle maximale en fonction de la période. Pour les périodes de houle inférieure à 2.5 secondes, la hauteur est limitée par le déferlement. Entre 2.5 et 4 secondes, elle est limitée par la puissance de l'installation. Au-delà de 4 secondes, la hauteur est limitée par la course du batteur (1.76 m).

## 2. Etude paramétrique

### 2.1 Identification des paramètres

Notre système de génération de houle et courant présente de nombreux paramètres géométriques pouvant influencer sur les caractéristiques de l'écoulement. Ce sont notamment :

- La profondeur d'immersion des conduites intégrant les pompes par rapport à la surface libre. Pour la génération de houle en condition de grande profondeur, l'orifice des conduites devrait être placé proche de la surface libre. Cependant, elles ne doivent pas non plus être trop proches de la surface libre pour éviter une prise d'air dans les creux de vagues qui pourraient être préjudiciable au fonctionnement des pompes.
- La hauteur des conduites intégrant les pompes par rapport à la hauteur de la colonne d'eau et l'orientation de l'axe des conduites par rapport au fond du bassin. Idéalement, pour la génération de courant, les hauteurs des conduites devraient être identiques à la hauteur de la colonne d'eau ; et l'axe des conduites devrait être parallèle au fond du bassin. Cependant, pour éviter la prise d'air par les pompes dans les creux de vagues, il est nécessaire que le point haut de l'orifice des conduites soit suffisamment immergé. En inclinant légèrement les pompes de manière à diriger leur jet vers la surface libre, et en comptant sur la diffusion de ce jet, on espère pouvoir obtenir un profil de courant acceptable.
- La géométrie des orifices d'entrée et de sortie des conduites, la longueur des conduites et du nid d'abeille. L'orifice de sortie est équipé d'un nid d'abeille dont le rôle est de filtrer les structures tourbillonnaires avant leur arrivée dans le bassin. Les géométries des deux orifices, de la conduite et du nid d'abeille influenceront notamment les pertes de charge - et donc le rendement énergétique global de l'installation - ainsi que le taux de turbulence dans le bassin et la génération d'ondes parasites.
- La longueur du réservoir de prise d'eau derrière les pompes. Des phénomènes de ballonnement peuvent apparaître à la surface libre du réservoir. Ils pourraient perturber les conditions d'entrée (pression, vitesse) pour les pompes. Le ballonnement pourrait être limité en ajoutant un dispositif pour dissiper les vagues dans le réservoir (plage, parois et/ou flotteurs)
- La géométrie de l'orifice de la conduite de re-circulation au bout du bassin. Elle est particulièrement importante pour la qualité du courant dans le cas de la génération de houle contre courant. A travers sa perte de charge, elle contribue également au rendement énergétique global du dispositif.

Evidemment, l'écoulement dépendra aussi des caractéristiques dynamiques du débit généré par les pompes. Ce sont notamment :

- Niveau du débit moyen. Du niveau de débit moyen dépend la vitesse du courant et son sens.
- Homogénéité spatiale. Idéalement, le profil spatial de vitesse en sortie de conduites devrait correspondre à celui de l'écoulement visé (houle seule, houle et courant, courant seul). Dans le cas de fortes variations verticales de la vitesse de l'écoulement (houle en condition de grande profondeur, courant cisailé), l'utilisation de plusieurs pompes les unes au dessus des autres et avec des pilotages différenciés pourraient permettre de s'adapter au profil de vitesse cible.
- Contenu harmonique, amplitudes et phases. Ils devraient être ajustés selon les conditions de houle visées (houle régulière ou irrégulière en grande profondeur ou en faible profondeur). Comme pour

la génération de houle avec des batteurs, il peut être utile de prévoir des termes correctifs sur les harmoniques pour limiter la génération d'ondes parasites [5,6].

## 2.2 Influence de la profondeur d'immersion et de la hauteur des conduites

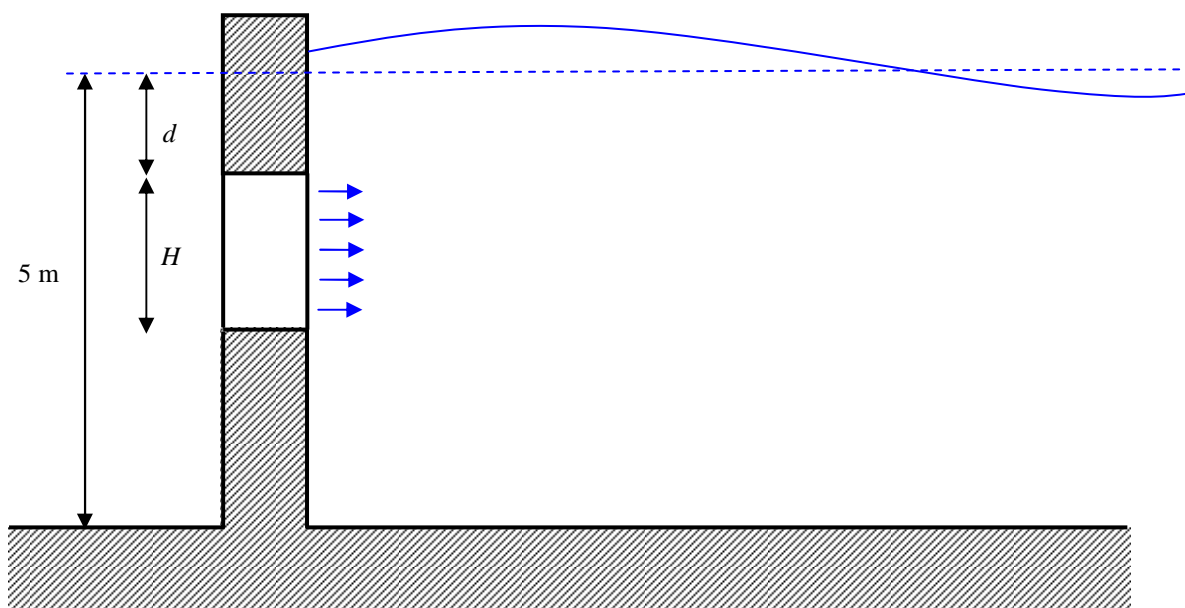


Figure 3: Définition de la profondeur d'immersion  $d$  et de la hauteur des conduites  $H$ .

Pour étudier l'influence de la profondeur d'immersion et de la hauteur des conduites, on s'appuie sur la théorie classique du batteur de houle [1]. Le cadre théorique est celui de la théorie potentielle linéarisée des écoulements à surface libre. On a utilisé les routines MATLAB développés par Meylan [3] pour calculer l'amplitude du mode propagatif et des modes évanescents.

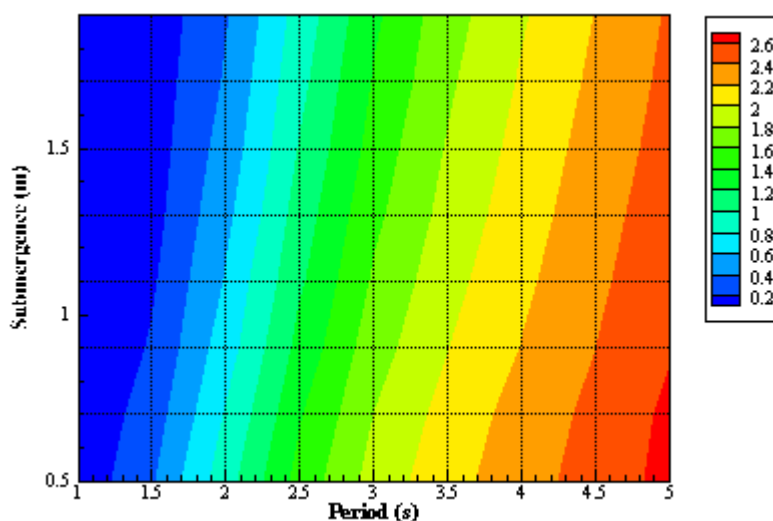


Figure 3: Rapport de la hauteur de vagues (en mètre) à l'amplitude du débit (en mètre par seconde) en fonction de la période la houle et de la profondeur d'immersion de la conduite. La hauteur de la conduite  $H$  est ajustée à la profondeur d'immersion  $d$  de telle sorte que  $d+H=2.85$  m.

On se donne comme point de référence le grand bassin de l'ECN. Pour cette partie de l'étude, on fixe donc la profondeur à 5 m et on fait varier la profondeur d'immersion  $d$  et la hauteur de conduite  $H$ . On impose la contrainte  $d+H=2.85$  m qui correspond à la hauteur des batteurs volets du bassin de l'ECN. La figure 3 présente le rapport de la hauteur de houle à l'amplitude du débit des pompes en fonction de la période de vagues et la profondeur d'immersion. Comme on s'y attendait, à période constante, la hauteur des vagues générées diminue quand la profondeur d'immersion augmente et il est donc avantageux de générer la houle au plus proche de la surface libre. De manière moins évidente a priori, il apparaît également que le

rapport hauteur de vagues – débit augmente nettement lorsqu'on augmente la période. Ainsi, pour une profondeur d'immersion de 0.5 m, la hauteur de houle est 0.055 m par  $\text{m}^3/\text{s}$  de débit pour une période de 1 s, 0.92 m par  $\text{m}^3/\text{s}$  pour 2 s et jusqu'à 2.3 m pour 4 s. Pratiquement, dans ce dernier cas, si on suppose une hauteur de conduite de 1.85 m, la vitesse de débit maximale à assurer est d'environ 0.5 m/s. Cela semble tout à fait réalisable d'un point de vue technique et il semble donc que ce dispositif pourrait aisément générer des vagues de 2 m de hauteur pour peu que la période soit suffisante. Il apparaît donc particulièrement adapté pour la génération de vagues longues et de grande amplitude.

## 2.2 Optimisation de la géométrie de la conduite

L'approche simplifiée basée sur la théorie du batteur de houle n'est pas pertinente pour étudier l'influence des détails de la géométrie de la conduite sur la génération de houle, de courant et de génération de houle et courant, principalement à cause de l'hypothèse d'écoulement irrotationnel. Un modèle numérique 2D a donc été développé sur la base du solveur Navier-Stokes ISIS-CFD (inclus dans la suite logicielle FINE/Marine [3]). La longueur du bassin numérique est à présent 30 m et la profondeur 1 m. On a choisi de placer la conduite de re-circulation sous le fond du bassin. Parmi la liste des paramètres énumérés précédemment, ce modèle permet notamment d'évaluer l'effet de l'angle  $\alpha$  entre l'axe des pompes et le fond du bassin (cf Figure 1); et de la forme de l'orifice de la conduite.

L'effet des pompes a été modélisé en imposant un champ de vitesse homogène dans le plan du disque hélice (indiqué par la ligne noire en travers de l'écoulement dans la Figure 5). Cette approche simplifiée fait l'hypothèse que l'action du nid d'abeille permet de redresser parfaitement l'écoulement en cassant les structures tourbillonnaires et en lissant spatialement la vitesse axiale. Elle ne prend pas en compte la turbulence résiduelle. En principe, la géométrie exacte des hélices des pompes et du nid d'abeille et leurs effets sur l'écoulement auraient pu être pris en compte, mais au prix d'une complexité numérique (complexité du maillage et temps de calcul) sans rapport avec les objectifs de ce projet. Avec l'approche simplifiée, la convergence numérique est obtenue avec un maillage de l'ordre de  $10^5$  cellules et un temps de calcul de l'ordre d'une heure par période de vagues avec un PC de bureau un peu ancien. La figure 5 montre un exemple de houle générée dans le bassin numérique par le dispositif.



Figure 5: Exemple de génération de houle. La période est 2 secondes. A droite du dispositif, dans le bassin, on peut voir la houle se propager. On constate l'existence d'harmoniques d'ordre élevé alors que le forçage est monochromatique.

Dans le réservoir à gauche, on peut voir qu'il existe un clapot, le dispositif générant des vagues des deux côtés.

### 2.2.1 Optimisation de l'angle $\alpha$ entre l'axe des pompes et le fond du bassin par rapport à l'homogénéité du courant

Dans la suite, on considère un dispositif constitué de deux pompes de diamètre 40 cm et situées l'une au dessus de l'autre, (cf Figure 1). La hauteur totale de la conduite est donc 80 cm, laissant ainsi une marge de 20 cm entre le point haut de la conduite et la surface libre au repos afin d'éviter la prise d'air.

L'angle  $\alpha$  entre l'axe des pompes et le fond du bassin est un paramètre clef quant à l'homogénéité du courant créé dans le bassin. Des angles de  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $20^\circ$  et  $30^\circ$  ont été testés. Pour ces différentes configurations, la Figure 6 compare les profils de vitesse de courant à une distance de 12 m du générateur. On constate qu'un angle de  $5^\circ$  permet d'obtenir le profil de courant le plus plat sur la plus grande hauteur. Des déficits de vitesse sont observés en fond de bassin et proche de la surface libre. Le déficit de vitesse en fond de bassin peut être expliqué par le développement de la couche limite.

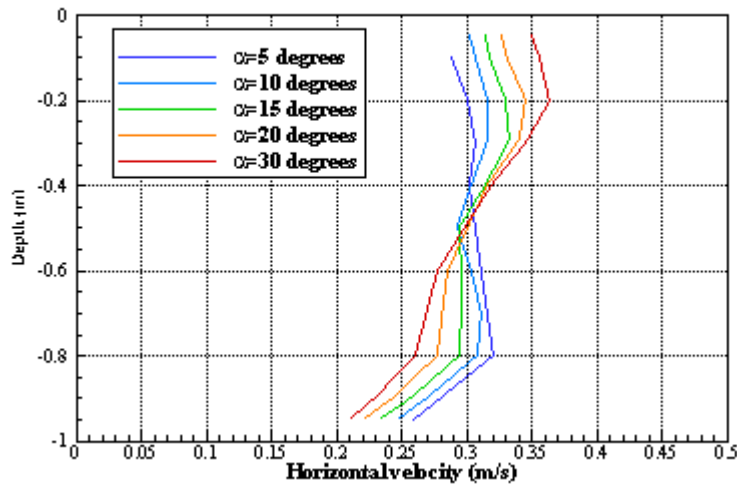


Figure 6: Comparaison des profils de vitesse de courant à une distance de 12 m du générateur pour différentes valeurs d'inclinaison de l'axe des pompes par rapport au fond du bassin.

### 2.2.2 Effet de la géométrie de l'orifice de sortie de conduite

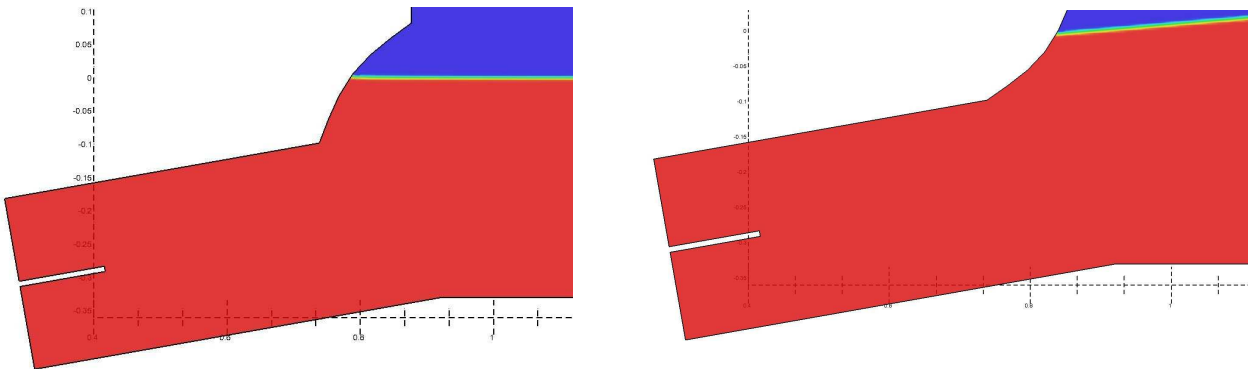


Figure 7: Exemples de géométries d'orifice ayant été étudié numériquement dans le but de minimiser la génération d'ondes libres.

Ici, on s'intéresse à l'effet de la géométrie de l'orifice de sortie de la conduite sur la qualité de la houle générée. La qualité est jugée sur le taux d'ondes libres. Plusieurs géométries ont été comparées. La figure 7 présente deux d'entre elles. Le taux d'ondes libres est déterminé à partir de l'élévation de surface libre mesurée par un réseau de sondes en plusieurs points du bassin. Les résultats indiquent que, pour les configurations testées, les détails de la géométrie de l'orifice n'ont pas d'effet notable sur la génération d'ondes libres.

## 3. Validation expérimentale

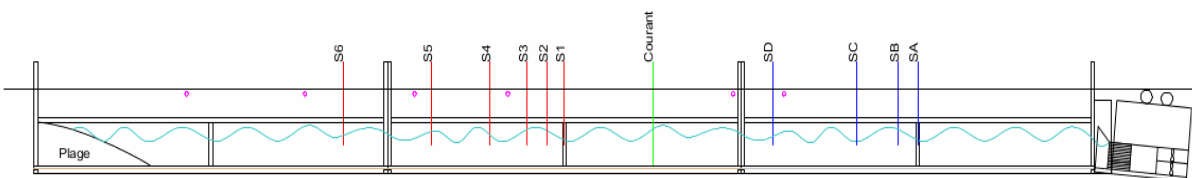


Figure 8: Schéma du canal à houle équipé du dispositif de génération installé dans le canal de circulation de l'Ecole Centrale de Nantes. Le schéma indique également la position des sondes à houle (lignes rouges et bleues). Un courantmètre (ligne verte) a aussi été installé pour mesurer le courant.

Un canal à houle équipé du dispositif a été installé dans le canal de circulation de l'Ecole Centrale de Nantes. Le canal mesure 12 m de long, 0.36 m de profondeur et 0.144 m de largeur. Il est équipé d'une plage à une extrémité, et du dispositif de génération à l'autre, cf Figure 8.

Des photographies du montage expérimental sont présentées Figure 9. Le canal est construit avec des rails aluminiums modulables de 40x40 et 80x40 (ARCANE). Les parois sont constituées de panneaux de



PVC expansé lisses (Komacell 10mm). Il est construit en trois parties de 4 m chacune qui sont assemblées afin de constituer un canal d'une longueur totale de 12 m. Le système de génération de houle et courant (photographie de droite sur la figure 9) est constitué d'une structure sur laquelle sont montés les équipements. La structure permet d'incliner le dispositif afin de créer un angle non nul entre le fond du canal et la direction de l'écoulement (angle  $\alpha$  sur la figure 1). Les équipements comprennent deux servomoteurs DC Parvex RS540C (1.5 kW chaque) montés sur le haut de la structure et pouvant être pilotés indépendamment. Ces moteurs entraînent via des courroies crantées et des renvois d'angle les arbres de deux hélices qui font office de pompes axiales. Les hélices sont celles de propulseurs d'étrave SE30 commercialisés par la société Side Power. Leur diamètre est 125 mm. Elles sont montées dans des tubes de 126 mm de diamètres intérieur. Ces deux tubes débouchent dans un caisson en trois parties. La première partie, d'une longueur et hauteur de 500 mm, sert de zone de mélange des flux. La seconde partie est équipée d'un nid d'abeille dont le rôle est de redresser la vitesse de l'écoulement avant son injection dans le canal. La longueur du nid d'abeille est 250 mm. La troisième partie, le diffuseur, assure la transition entre l'écoulement en conduite et l'écoulement à surface libre. Sa paroi haute est inclinée. Sa longueur est 640 mm.

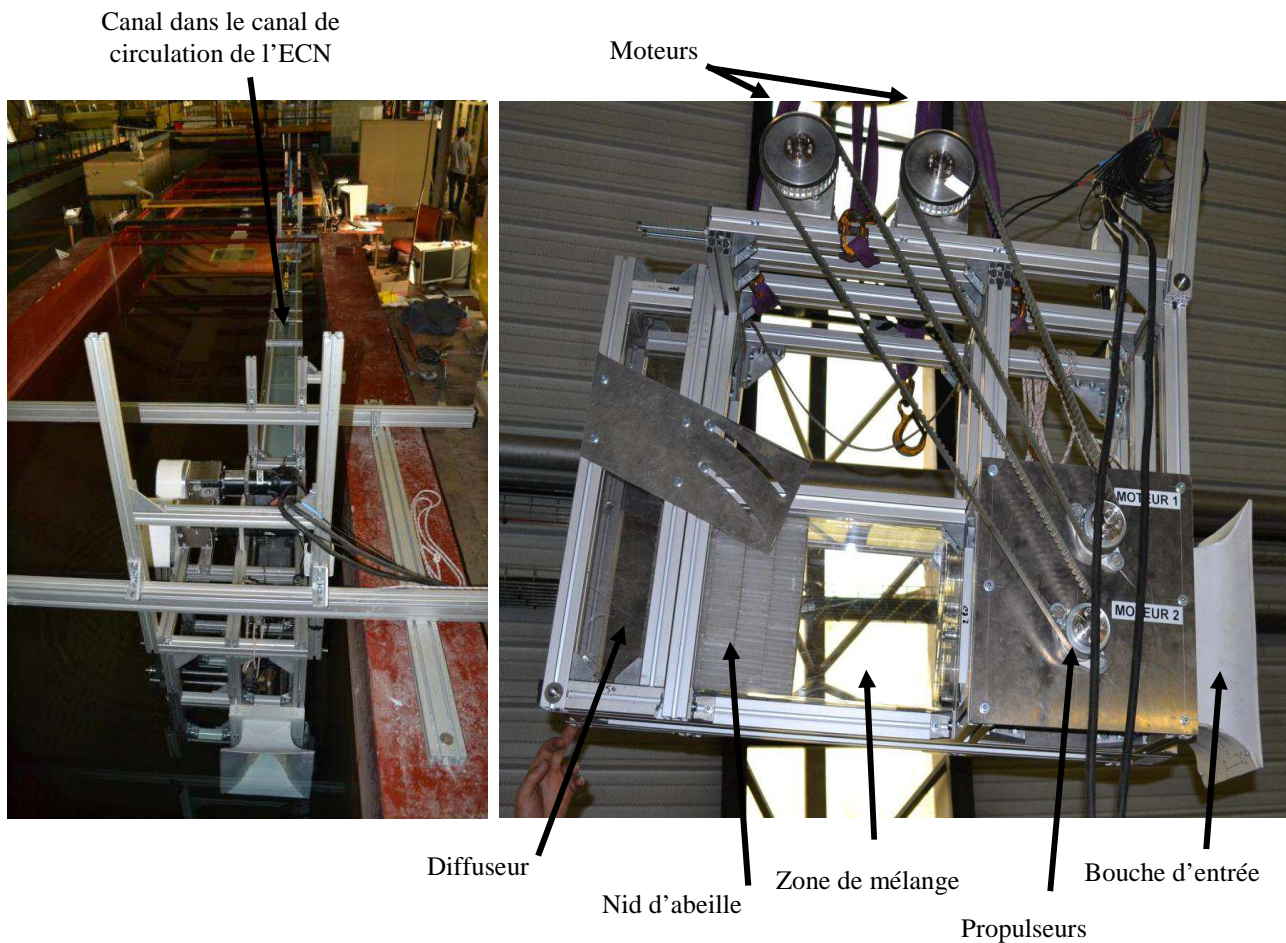


Figure 9: Photographies du canal (à gauche) et du dispositif de génération de houle (à droite)

La hauteur de houle est mesurée tout le long du canal grâce à deux réseaux de quatre sondes résistives. Le courant est mesuré à l'aide de deux courantomètres à hélice. Des tachymètres ont été installés sur les moteurs afin d'asservir la vitesse de rotation. Les deux moteurs sont pilotés avec la même consigne de vitesse. Les tensions et courants d'alimentation des moteurs sont mesurés pour pouvoir déterminer le rendement énergétique de l'installation.

### 3.1 Qualification du courant

Pour la qualification des capacités du dispositif en terme de génération de courant, on s'est d'abord intéressé à l'effet de son inclinaison sur le profil de vitesse. Il a été mesuré à l'aide d'un courantomètre à cinq mètres en aval du dispositif de génération pour des inclinaisons de 0°, 5°, 10°, 15° et 20°. L'inclinaison de 5° a permis d'obtenir un courant de 0.18 m/s avec le profil de courant le plus plat. Elle a donc été retenue par la suite.

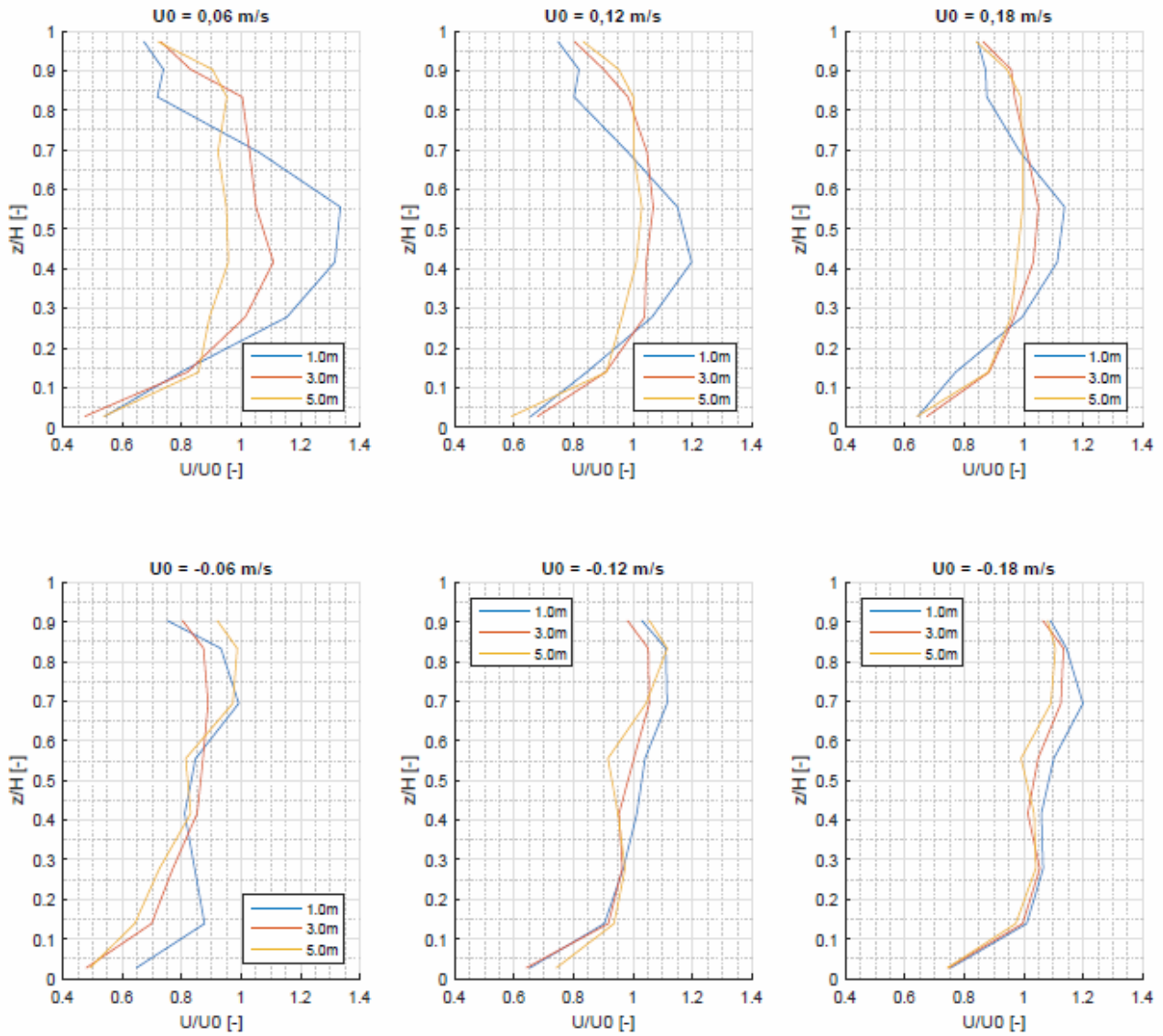


Figure 10: Profils de vitesse mesurés par le courantomètre à 1 m, 3m et 5 m en aval du dispositif de génération en fonction de la vitesse. La vitesse de référence  $U_0$  correspond la mesure à 200 mm du fond du canal et à 5 m en aval. La hauteur du canal est  $H=0.36$  m. L'inclinaison des pompes est de  $5^\circ$ . Les vitesses de courant négatives correspondent à un fonctionnement en aspiration des pompes.

La figure 14 présente les profils verticaux de vitesse de courant mesurés par le courantomètre à différents endroits et pour différentes vitesses. Les profils de vitesse visibles sur la figure 10 apparaissent relativement plats sur la majeure partie de la colonne d'eau, y compris en configuration de vitesse de courant négative. Ces résultats valident la capacité du dispositif à générer du courant dans les deux directions.

### 3.2 Qualification de la houle

Pour la génération de houle, la consigne de vitesse de rotation appliquée aux moteurs est sinusoïdale. Les deux moteurs sont pilotés de manière identique. L'élévation de surface libre en plusieurs points du canal a été mesurée pour différentes périodes et amplitudes de consigne.



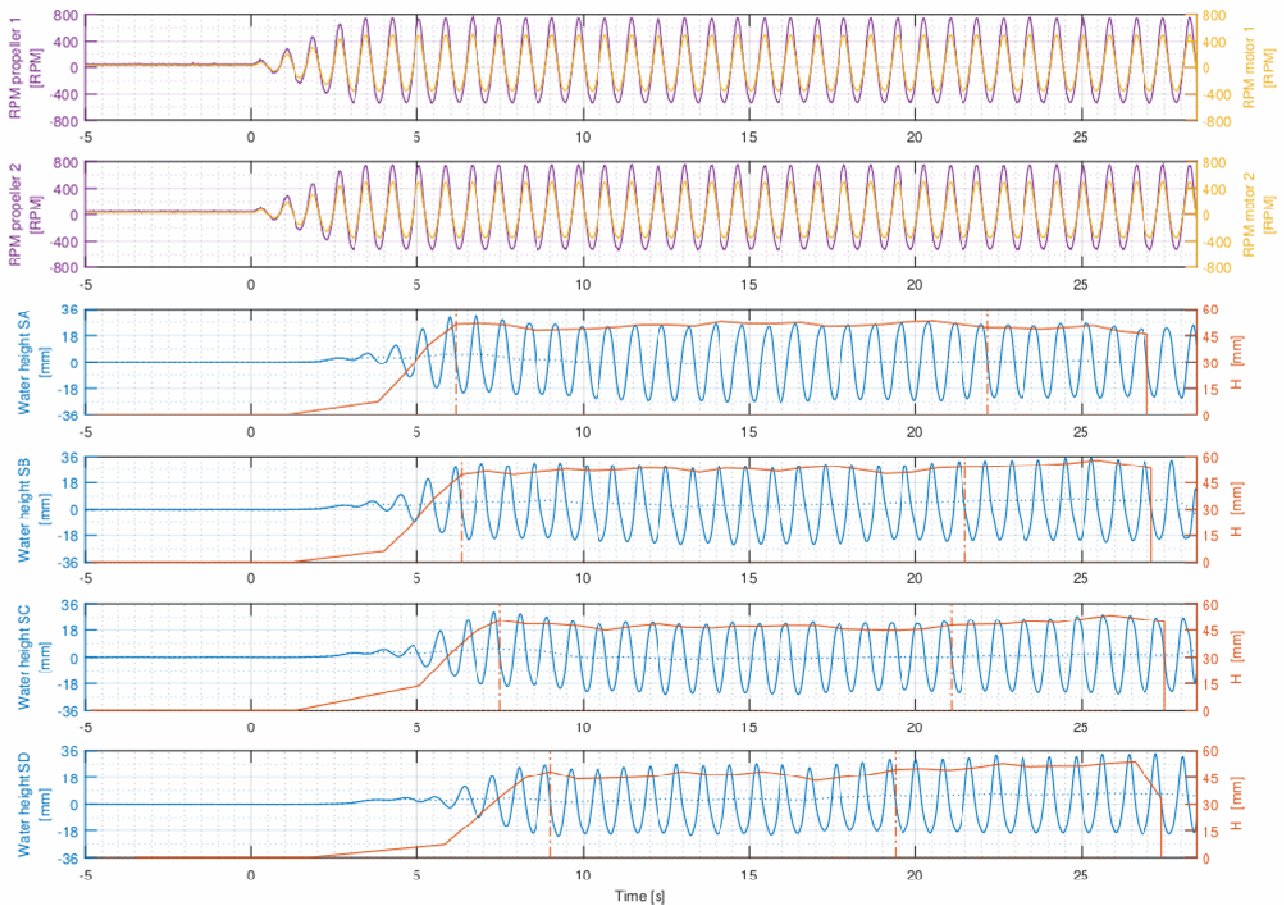


Figure 11: De haut en bas : enregistrements temporel de la vitesse de rotation des deux moteurs (en jaune) et hélices (en violet) et de l'élévation de surface libre à 2 m en aval du générateur de houle, 2.22 m, 2.69 m et 3.64 m (en bleu). Les lignes orange correspondent à la hauteur de la houle en moyenne glissante obtenue par une analyse vague par vague. La période est 0.8 s, l'amplitude de la vitesse de rotation des moteurs est 400 rpm et la moyenne est 0 rpm (vitesse de courant nulle).

La figure 11 donne un exemple des enregistrements temporels de la vitesse de rotation des deux moteurs et hélices ainsi que l'élévation de surface libre. Comme on l'espérait, on peut voir que des vagues sont générées et qu'elles se propagent dans le canal. On voit cependant que les vagues générées ne sont pas parfaitement sinusoïdales. Le dispositif génère aussi des ondes parasites.

La figure suivante (figure 12) présente la hauteur moyenne de la houle générée en fonction du carré de l'amplitude de consigne pour la vitesse de rotation, et ce pour différentes périodes. La hauteur moyenne est calculée par une analyse vague par vague du signal d'élévation de surface libre mesurée à 2.22 m du générateur. On constate la hauteur de houle générée semble augmenter linéairement avec le carré de l'amplitude de la vitesse de rotation pour les faibles vitesses (jusqu'à environ 500 rpm (=250 000 rpm<sup>2</sup>)). Cette observation est logique en se rappelant que pour une hélice, la poussée dépend du carré de la vitesse de rotation. Cette poussée correspond à un champ de pression sur une surface pour le fluide, et la pression est elle liée linéairement à la hauteur de houle. Au-delà de 500 rpm, on voit que les courbes hauteur – vitesse de rotation s'infléchissent pour atteindre à haute vitesse une hauteur limite. Cette limite est cependant assez éloignée de la limite de déferlement théorique, écart que nous ne savons pas expliquer à l'heure actuelle.

On observe également que à amplitude de vitesse de rotation constante, la hauteur de houle générée augmente avec la période. Aux basses vitesses de rotation, l'augmentation semble approximativement linéaire avec la période (0.26 m pour une période de 0.6 s à 100 rpm, 0.048 m pour 1.2 s, 0.06 m pour 1.8 s). Cet aspect est particulièrement intéressant d'un point de vue technique car il confirme l'intérêt du dispositif pour générer des vagues longues et de grande amplitude. A titre de comparaison, pour les vagues les plus grosses qu'on a générées (1.8 s de période, 0.13 m de hauteur dans 0.36m de profondeur d'eau), il faudrait utiliser un batteur piston disposant d'une course totale de 0.2 m. La figure 12 ne présente pas de résultats pour expérimentaux pour des hauteurs plus grande que 0.13 m car au-delà, nous avons été confronté à des problèmes de débordement, les bords du canal n'étant pas assez haut.

A ce stage, il nous faut préciser qu'il a été observé dans nos essais que la qualité de la houle obtenue est décevante en terme taux d'ondes liées et libres dès que l'effet de la profondeur d'eau se fait sentir. Dans des configurations de profondeur finie, pour un batteur piston, il est bien connu qu'une commande batteur de

type sinusoïde est insuffisante [5,6] et des corrections sont nécessaires. Dans le cas du dispositif présenté ici, les mêmes difficultés apparaissent. Un travail complémentaire sur la consigne de la vitesse de rotation des hélices semble donc nécessaire.

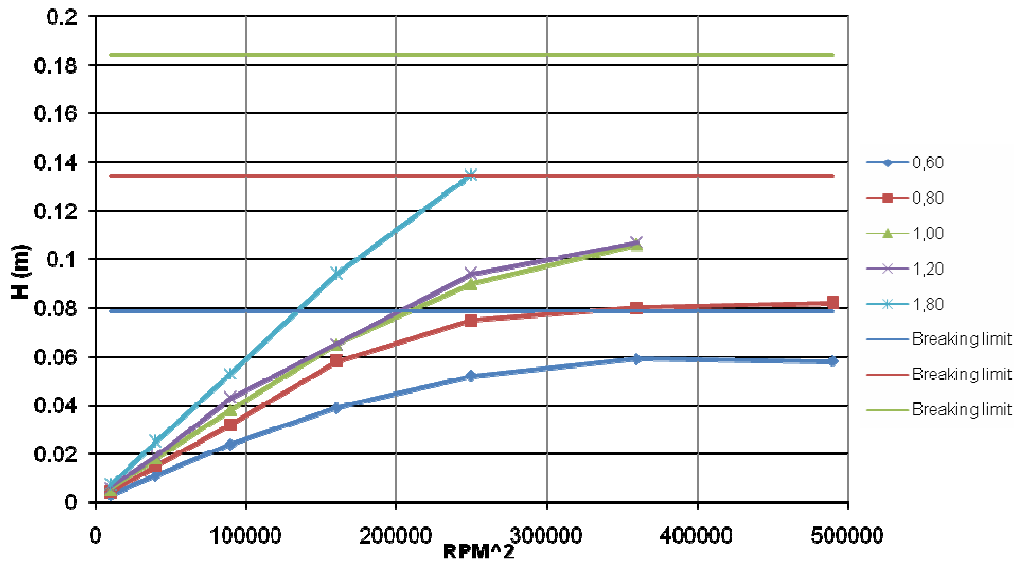


Figure 12: Hauteur de vague en fonction du carré de l'amplitude de consigne pour la vitesse de rotation et de la période de vague. La hauteur de vague est obtenue par une analyse vague par vague de la mesure de l'élévation de surface libre à 2.22 m du générateur.

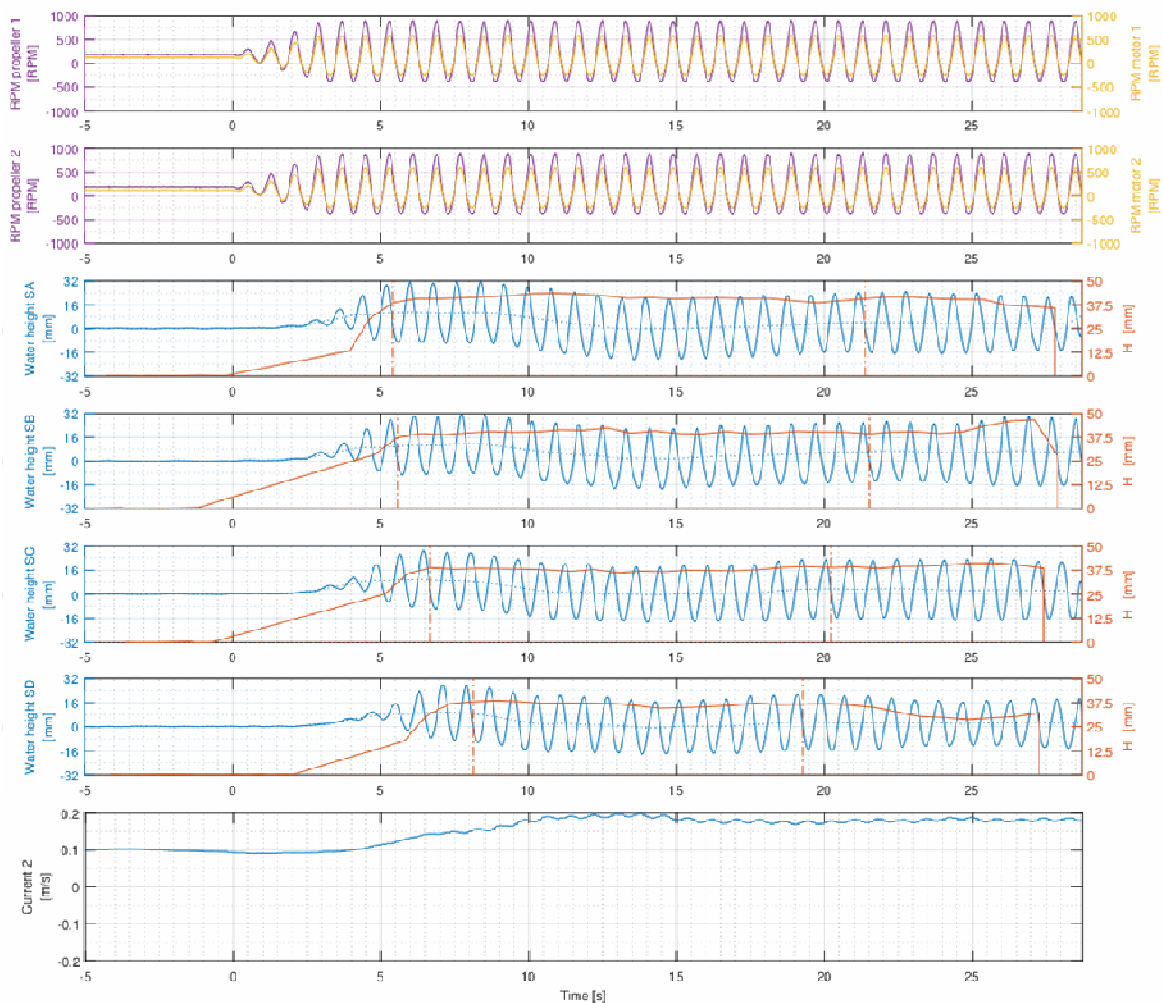


Figure 13: De haut en bas : enregistrements temporel de la vitesse de rotation des deux moteurs (en jaune) et hélices (en violet), de l'élévation de surface libre à 2 m en aval du générateur de vague, 2.22 m, 2.69 m et 3.64 m (en bleu) et de la vitesse du courant. Les lignes orange correspondent à la hauteur de la vague en moyenne glissante obtenue par une analyse vague par vague. La période est 0.8 s, l'amplitude de la vitesse de rotation des moteurs est 400 rpm et la moyenne est environ 150 rpm (vitesse de courant positive de 0.1 m/s).

### 3.3 Qualification de la génération de houle et courant

Pour la génération de houle et courant, la loi de pilotage en vitesse des hélices est constituée par une sinusoïde décalée de manière à obtenir une vitesse moyenne non nulle. Selon le signe de la moyenne, on génère une houle se propageant avec ou contre le courant.

La figure 13 présente les résultats d'un essai pour une période de 0.8 s, une amplitude de variation de la vitesse de rotation de 400 rpm et une moyenne positive à 150 rpm. Comme dans les essais décrits précédemment, les deux moteurs sont pilotés avec la même consigne. Ils sont d'abord mis en rotation à la vitesse moyenne afin que le courant s'établisse dans le canal ( $t < 0$  s sur la figure 13). Une fois le courant stabilisé, la modulation de vitesse est progressivement introduite à partir de  $t=0$  s grâce à une rampe sur les trois premières périodes. Sur les signaux d'élévation de surface libre, on peut observer l'apparition et la propagation des vagues. La hauteur de la houle est de l'ordre de 40 mm, soit un peu inférieure au cas sans courant (de l'ordre de 10%). En comparant la figure 11 et la figure 13, on voit aussi que la propagation est plus rapide, les premières vagues arrivant plus tôt sur les sondes dans la configuration avec courant. On constate également que le courant accélère en présence de houle. Il passe ainsi de 0.1 m/s à presque 0.2 m/s.

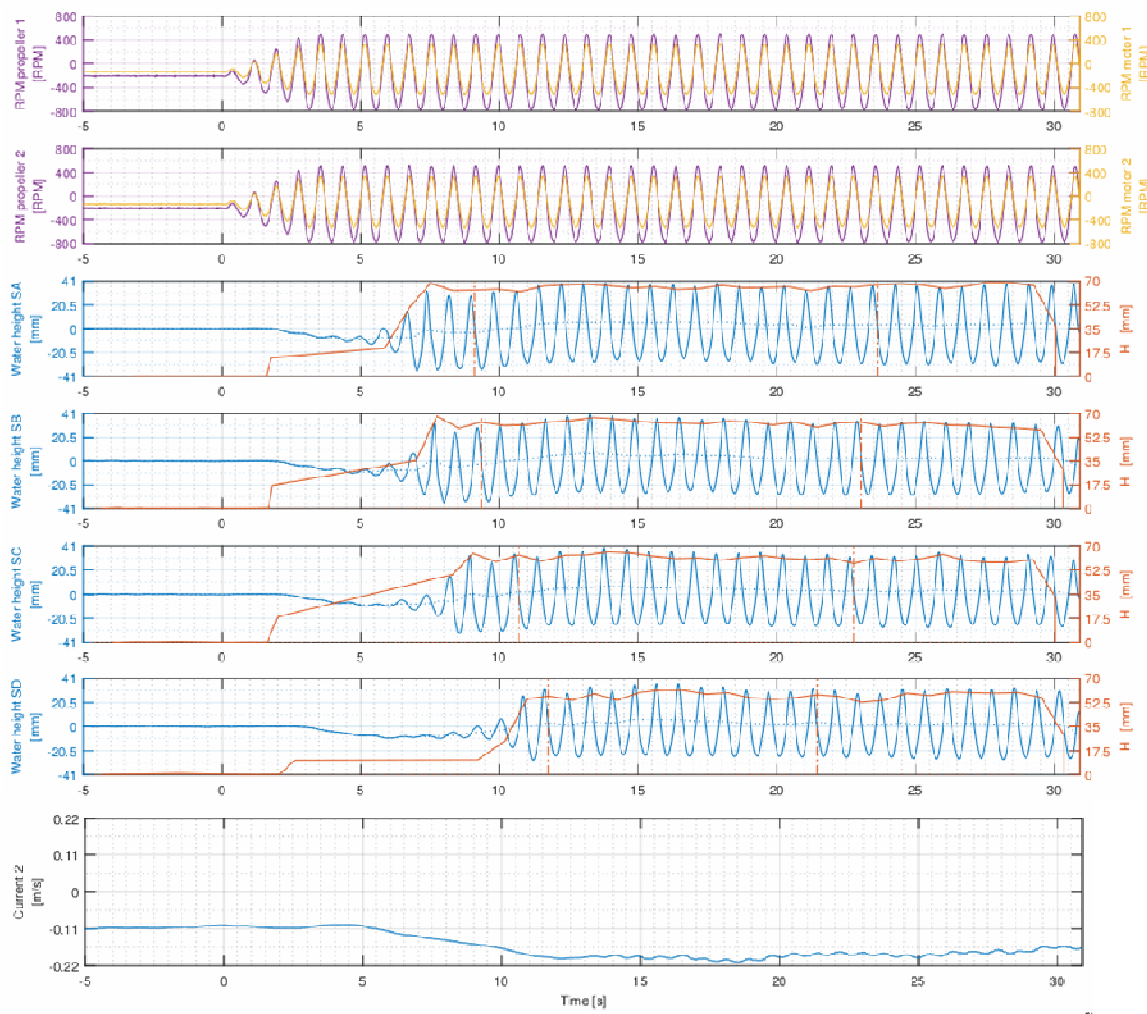


Figure 14: De haut en bas : enregistrements temporel de la vitesse de rotation des deux moteurs (en jaune) et hélices (en violet), de l'élévation de surface libre à 2 m en aval du générateur de houle, 2.22 m, 2.69 m et 3.64 m (en bleu) et de la vitesse du courant. Les lignes orange correspondent à la hauteur de la houle en moyenne glissante obtenue par une analyse vague par vague. La période est 0.8 s, l'amplitude de la vitesse de rotation des moteurs est 400 rpm et la moyenne est environ -150 rpm (vitesse de courant positive de -0.1 m/s).

La figure 14 présente les résultats d'un essai pour une période de 0.8 s, une amplitude de variation de la vitesse de rotation de 400 rpm et une moyenne négative à 150 rpm. Dans ce cas, les pompes fonctionnent en aspiration et le courant est négatif. En l'absence de vagues, le courant est de l'ordre de -0.1 m/s. A nouveau, on peut observer qu'à partir du moment où la vitesse de rotation des hélices se met à varier, des vagues sont générées et se propagent dans le canal. Cette fois, dans cette configuration houle contre courant, on peut voir que les vagues sont nettement plus hautes que dans la configuration sans courant (presque 70 mm contre 45 mm sans courant). On observe aussi que les vagues arrivent nettement plus tard au niveau des sondes en raison du courant qui les ralentit. Comme dans le cas houle avec courant, le courant

moyen accélère nettement avec les vagues. Il passe ainsi de -0.1 m/s à presque -0.2 m/s. Le courant de retour seul, estimé à -0.01 m/s, ne peut expliquer seul ce phénomène.

## 4. Conclusion

Dans cette étude, on a présenté la preuve de concept d'un nouveau dispositif de génération de houle courant. Le dispositif est constitué de pompes axiales qui sont pilotées de manière à générer un débit fluctuant. Ces fluctuations se traduisent par la génération de vagues à la surface libre. Si le débit moyen est non nul, un courant se superpose à la houle. En plus de permettre la génération de courant et de houle, l'absence de fin de course permet de générer aisément des vagues de longues périodes et grandes hauteurs. Il pourrait donc être une solution technique particulièrement pertinente pour les projets de piscine de surf indoor qui émergent de part le monde.

Un montage expérimental a été réalisé à l'Ecole Centrale De Nantes. Il a permis de valider la génération de courant, la génération de houle, et la génération de houle se propageant avec et contre le courant. Cependant, il est apparu lors de ses essais que la qualité de la houle générée en conditions de profondeur finie n'est pas satisfaisante, notamment en comparaison de la houle obtenue par des générateurs classiques, comme par exemple un batteur piston. Pour pouvoir prétendre concurrencer cette dernière technologie, il est donc à présent nécessaire d'améliorer le pilotage des pompes afin d'éviter la génération d'harmoniques parasites.

Une autre difficulté apparue lors de ces essais est le rendement énergétique global du dispositif. En comparant la puissance de la houle générée dans le bassin à la consommation électrique des moteurs, il a été observé que le rendement était au mieux de quelques pourcents. Nous pensons que les principales sources de perte énergétique sont d'une part liées au mauvais rendement de l'hélice qui fonctionne loin du régime nominal, et d'autre part à l'inertie de l'ensemble moteur, transmission, arbres et poulies. En effet, ce premier montage réalisé pour la preuve de concept était relativement simple, et peu optimisé au niveau mécanique. Une pompe bien dimensionnée, dont le moteur serait intégré dans le moyeu, tournant à vitesse constante et dont la poussée variable serait fournie grâce à une hélice à pales à pas variables pourrait répondre à cette problématique. Ces paramètres ont été pris en compte lors de la conception du démonstrateur, actuellement en développement à l'ECN.

## Remerciements :

Les auteurs remercient le CNRS et la SATT Ouest Valorisation (projet TURBHO) ainsi que le LabexMer (ANR-10-LABX-19-01) pour leurs soutiens financiers.

## Références

- [1] R.G. Dean, R.A. Dalrymple, 1991, *Water wave mechanics for engineers and scientists*. World Scientific.
- [2] A. Babarit, S. Delvoe, 2015, *Système de génération de vagues dans un bassin*. Patent pending.
- [3] [www.wikiwaves.org/Wavemaker\\_Theory](http://www.wikiwaves.org/Wavemaker_Theory) Last accessed on September, 29th, 2016
- [4] P. Queutey, M. Visonneau, 2007, An interface capturing method for free-surface hydrodynamic flows, *Computers & Fluids*, pp. 1481-1510
- [5] R.T. Hudspeth, W. Sulilisz, 1991, Stokes drift in two-dimensional wave flumes, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 203, pp. 209-229
- [6] H. Zhang, H.A. Schäffer, 2007, Approximate Stream function wavemaker theory for highly non-linear waves in wave flumes, *Ocean Engineering*, Vol. 34(8-9), pp. 1290-1302