



# 16<sup>èmes</sup> Journées de l'Hydrodynamique

27-29 novembre 2018 - Marseille



CENTRALE  
MARSEILLE



## RENDEMENT ÉNERGÉTIQUE DE LA GÉNÉRATION DE VAGUES AVEC DES POMPES AXIALES

### *ENERGY EFFICIENCY OF WAVE GENERATION WITH AXIAL-FLOW PUMPS*

A. BABARIT<sup>(1)</sup>, J. PINAULT<sup>(1)</sup>, A. LEMOINE<sup>(1)</sup>, L. DAVOUST<sup>(1)</sup>,  
S. DELVOYE<sup>(1)</sup>, F. BONNEFOY<sup>(1)</sup>, G. PAYNE<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup>LHEEA, Ecole Centrale de Nantes-CNRS, Nantes, France

<sup>(2)</sup>Department of Naval Architecture, Ocean & Marine Engineering, University of Strathclyde, Glasgow, Écosse

### 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 s'appuie sur l'utilisation d'hélices à pas variable, afin d'imposer une condition fluctuante à la surface libre, ce qui permet de générer des vagues. Les précédentes études menées avaient mis en évidence les capacités du système à générer de la houle, mais la qualité des vagues était plutôt médiocre et les rendements étaient alors très faibles. Afin d'améliorer ce dernier aspect, un nouveau montage a été conçu et réalisé. Il a été testé durant l'été 2017 et amélioré durant l'été 2018. Les tests ont permis de mettre en évidence les capacités du nouveau système à générer de la houle, et le rendement atteint des valeurs allant jusqu'à 11%.

### Summary

A new concept for wave and current generation has been invented at Ecole Centrale De Nantes. It consists of axial-flow pumps with variable-pitch propeller driven to generate an oscillatory flow. Oscillations of the flow lead to the generation of water waves at the free surface. Previous studies showed the ability of the system to generate wave, but the waves quality as well as the efficiency were found to be poor. In order to adress this second issue, a new set-up has been developped. was tested over the summers 2017 and 2018. Results shows that the efficiency is significantly increased. Maximum efficiency reaches 11%.

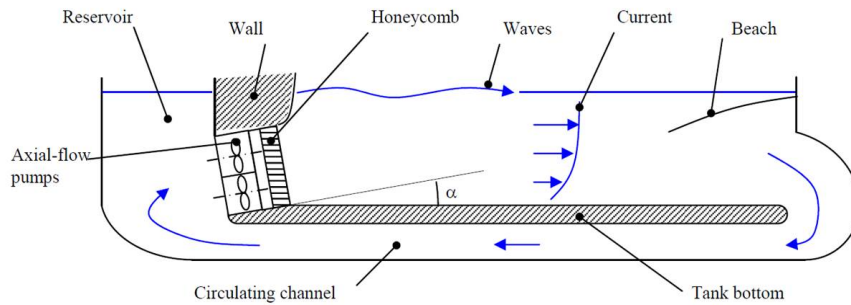


FIGURE 1 – Schéma de l'arrangement général pour la génération de vagues et courant dans un canal à houle avec des pompes axiales.

## I – Introduction

Depuis 2015, Centrale Nantes étudie un nouveau système de génération de houle et courant [1]. Le concept est de mettre en œuvre des pompes axiales à la place des batteurs conventionnels pour la génération d'un écoulement oscillant à l'une des extrémités d'un canal à houle. Cet écoulement oscillant, semblable à la condition limite obtenue avec un batteur à houle conventionnel, conduit à la génération de vagues propagatives à la surface libre. L'arrangement général est présenté sur la figure 1.

Le canal est constitué d'un bassin où est générée la houle et le courant, d'un réservoir séparé du canal par un mur, et de conduites permettant des échanges de fluide entre le canal et le réservoir. Les générateurs de houle (pompes axiales) sont placés dans les conduites qui débouchent du côté génération de houle du canal. Des nids d'abeilles sont placés à l'extrémité des conduites afin de rectifier l'écoulement. À l'autre extrémité du canal, une plage absorbante permet la dissipation de la houle. Dans le cas de génération d'un courant, une conduite placée sous le canal permet d'assurer la recirculation.

Ce concept a été testé en 2015 à Centrale Nantes. Le montage expérimental était constitué d'un canal à houle immergé dans le canal de circulation. La longueur du canal à houle était 1200cm, la profondeur 36cm et la largeur 14.4cm. Le caisson de génération était placé à une extrémité du canal et une plage absorbante (plan incliné) à l'autre extrémité. Le caisson de génération était constitué d'un bâti sur lequel était monté sur le dessus, hors de l'eau, deux moteurs électriques de puissances nominales 1.5kW. Les arbres des moteurs étaient reliés aux arbres des pompes axiales par des courroies crantées. Le diamètre des hélices des pompes étaient 125mm. Elles étaient montées dans des conduites de diamètre 126mm. La figure 2 montre une photo du système de génération ainsi qu'un schéma et une photo du montage expérimental.

Ce montage a permis de démontrer la capacité du concept à générer du courant, des vagues, et des vagues se propageant avec ou contre le courant [2]. Cependant, l'analyse des résultats expérimentaux a mis en évidence deux difficultés majeures. D'une part, la houle en conditions de profondeur intermédiaire est de mauvaise qualité à cause de la génération d'harmoniques parasites. Dans le cas de la génération de houle avec des batteurs conventionnels, il est bien connu que des corrections doivent être prises en compte sur la commande du batteur pour éviter la génération de ces ondes parasites [3]. Ces corrections ne peuvent pas être prises en compte à l'heure actuelle dans le contrôle du débit généré par les pompes car la fonction de transfert entre la vitesse de rotation des pompes et le débit n'est pas connue. D'autre part, le maximum de rendement énergétique mesuré était

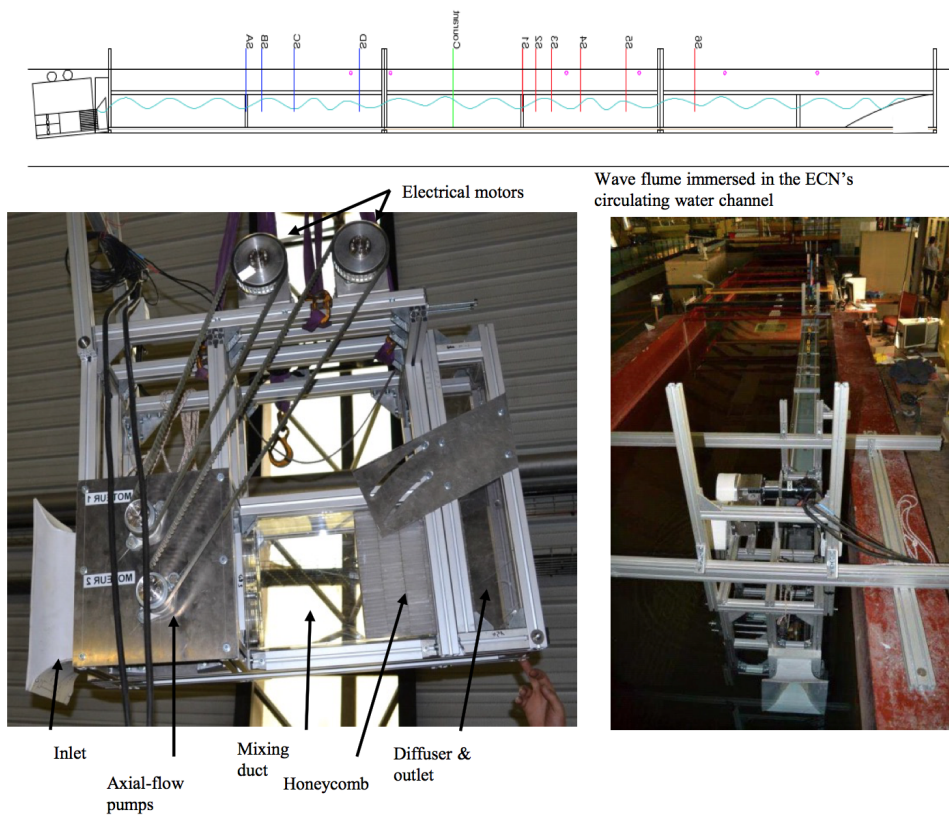


FIGURE 2 – Photos et schéma du montage expérimental de la première génération du générateur de houle et courant TURBHO. Le schéma sur le dessus montre le montage expérimental ainsi que la position des sondes à houle. La photo en bas à droite montre le caisson de génération, et la photo à droite le canal de circulation dans le canal de circulation de l'ECN.

de l'ordre de 4%, ce qui est très faible en comparaison de celui des batteurs conventionnels. Celui-ci est en effet d'un ordre de grandeur supérieur (en théorie, le rendement des batteurs piston en configuration « dry-back » peut-être proche de 100% en conditions de faible profondeur).

Ce faible rendement énergétique peut être expliqué par trois facteurs. D'une part, le système génère des vagues des deux côtés. En effet, la condition limite à l'embouchure de la conduite côté bassin est similaire à celle côté réservoir, conduisant à la radiation d'une quantité d'énergie similaire du côté réservoir par rapport au côté bassin. Cet aspect limite le rendement énergétique maximal à 50%. D'autre part, les hélices utilisées dans les essais sont conçues pour une vitesse de rotation de 2000rpm et un écoulement stationnaire, alors que dans les essais l'écoulement est oscillant et la vitesse maximale de rotation 750rpm. Enfin, le fonctionnement en mode oscillatoire implique la mise en œuvre de puissance réactive pour accélérer puis ralentir la dynamique du montage, afin de vaincre les effets d'inertie.

Dans le but d'améliorer le rendement, un nouveau dispositif a été conçu. Il est constitué d'un caisson de section carrée contenant une conduite dont la partie centrale est circulaire. Un moteur étanche entraînant une hélice est placé dans cette partie centrale. La vitesse de rotation du moteur est constante afin de limiter les pertes liées à la puissance réactive. L'hélice est munie de trois pales symétriques dont l'angle de calage est variable et contrôlé par un servomoteur. L'écoulement oscillant est obtenu en faisant varier cet angle.

La longueur du caisson est 140cm et sa section est carrée de côté 40cm. Le caisson est muni de nids d'abeille à chaque extrémité pour la rectification de l'écoulement. Les caissons peuvent être placés les uns au dessus des autres et/ou les uns à côté des autres pour générer des vagues sur une hauteur et une largeur plus grandes que la section du caisson. Une configuration avec 4 caissons occupant la largeur du canal de circulation de Centrale Nantes est illustrée Figure 3.

La génération de houle est obtenue en démarrant d'abord le moteur avec l'angle des pâles en position neutre. Lorsque le moteur a atteint une vitesse de rotation constante, le servomoteur est utilisé pour contrôler l'angle de calage des pâles en suivant une consigne sinusoïdale. La période de la consigne détermine la période des vagues générées, et l'amplitude de l'angle de calage l'amplitude de la houle. La figure 3 montre un exemple du signal enregistré par une sonde pour des vagues obtenues avec cette procédure et la configuration avec 4 caissons placés les uns à côté des autres.

Des essais systématiques avec un caisson ont été réalisés à Centrale Nantes afin de caractériser le rendement énergétique de la seconde génération du TURBHO. L'objet de cet article est de présenter ces résultats. Le montage expérimental et les méthodes utilisés sont présentés dans la première section. La seconde section présente les résultats obtenus.

## II – Description du montage et des méthodes utilisées

### II – 1 Montage

Pour ces essais, un seul caisson a été utilisé. Le canal de circulation de Centrale Nantes mesurant 2m de largeur, un canal dans le canal a été mis en place afin d'éviter la diffraction de la houle et sa réflexion sur les parois extérieurs du canal de circulation. Ce canal est constituée pour un côté de la paroi du canal de circulation, et pour l'autre côté d'une paroi placée à 40cm du mur du canal. Le caisson de génération est insérée entre les deux parois. La profondeur d'eau est de 45cm, afin d'éviter des problèmes de ventilation. La



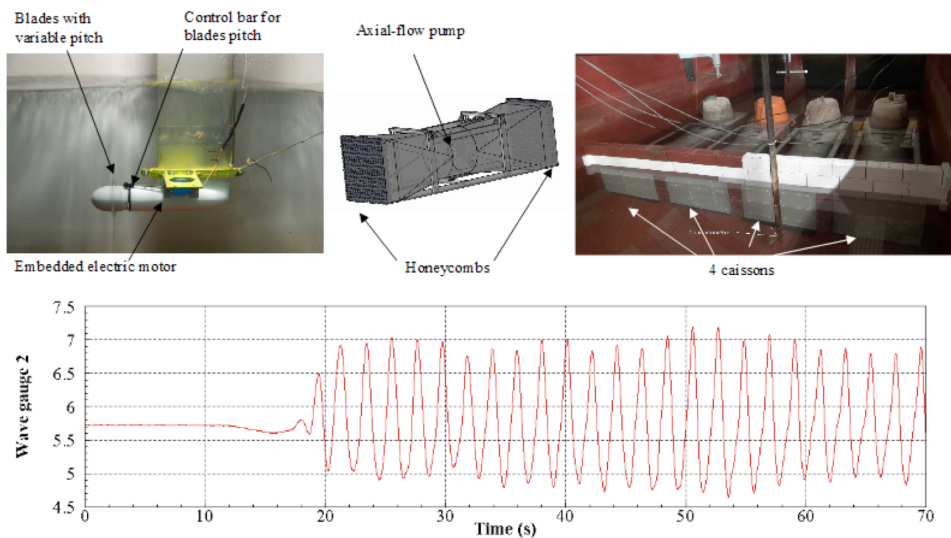


FIGURE 3 – Photos et schémas de la seconde génération du générateur de houle et courant TURBHO. La photo en haut à gauche montre la pompe hélice lors d’essais en eau libre, le schéma au centre montre une CAO du caisson et la photo à droite montre une configuration d’essai avec 4 caissons placés côte-à-côte dans le canal de circulation de Centrale Nantes. En bas, la figure présente le signal d’une sonde à houle enregistré lors d’un essai avec la configuration à 4 caissons. La période de la houle est 2s.



FIGURE 4 – Vue de dessus du canal mis en place.

photographie 4 est une vue de dessus du canal dans le canal. La houle se déplace sur l’image de la droite vers la gauche, comme indiqué par la flèche en rouge.

Comme indiqué ci-dessus, le caisson de génération contient une pompe axiale constituée d’un moteur entraînant une hélice dont le calage des pâles est variable et contrôlé. Les pâles de l’hélice de la pompe sont constitués d’une âme métallique, plate, et d’un habillage en plastique permettant de donner aux pâles un profil plus hydrodynamique. Le profil est symétrique. Trois jeux d’habillage de pâles, de dimensions variables, ont été réalisés par impression 3D. Ces trois profils ont été testés afin de déterminer lequel est le plus performant pour la génération de houle, et c’est celui-là qui a été utilisé dans les essais présentés dans cet article.

La houle a été mesurée à l’aide de sondes à houle résistives. Une sonde a été placée tous les 45cm environ (profondeur d’eau) ainsi qu’une à une vingtaine de centimètres de la tuyère, pour mesurer les ondes évanescentes. La figure 5 schématise le montage mis en place.

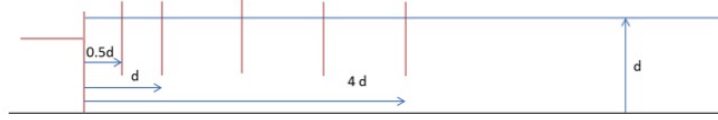


FIGURE 5 – Schéma du montage mis en place.

## II – 2 Paramètres d'étude

Afin de déterminer le fonctionnement optimal du système et d'en explorer les capacités, plusieurs paramètres ont été testés. Les paramètres étudiés ainsi que leur plage de variation sont :

- vitesse de rotation (4 valeurs : 700 rpm, 800rpm, 1000rpm, 1200rpm)
- angle de pale (5 valeurs : 5°, 10°, 15°, 20°, 30°)
- fréquence (0.3Hz, 0.4Hz, 0.6Hz)

Dans cette étude, nous nous sommes particulièrement intéressés aux vagues longues, qui sont les plus énergétiques. En effet, une application possible de ce système est la génération de vagues dans des bassins de loisir pour la pratique du surf. Cependant, en dessous de 0.3Hz, il a été observé que la consigne est mal suivie. Nous nous sommes donc focalisés sur les fréquences 0.3Hz, 0.4Hz et 0.6Hz.

L'angle de pale maximal est de 40°. Pour éviter le risque d'endommager le système, nous avons limité l'amplitude de l'angle à 30° au maximum. Par ailleurs, en dessous de 5°, la consigne est mal suivie à cause de l'échantillonnage du servomoteur. Cette valeur a donc été retenue comme limite basse.

Les vitesses de rotation ont été choisies en fonction des caractéristiques du moteur. Initialement, les essais étaient effectués avec des vitesses faibles (entre 400 et 800rpm). Or, la vitesse maximale du moteur est 2000rpm. Nous avons donc choisi de nous placer à la moitié de la capacité maximale du moteur, dans l'espoir de fonctionner autour du point de fonctionnement, afin d'optimiser le rendement.

## II – 3 Méthode de calcul du rendement

Le rendement énergétique a été choisi comme principal critère d'analyse de la performance du système. Pour cela, il faut calculer la puissance transportée par les vagues générées, et la rapporter à la puissance consommée par le moteur pour qu'il génère ces vagues.

Dans le cadre de la théorie linéaire, la puissance transportée par une vague régulière  $J_0$  [2] s'écrit :

$$J_0 = \frac{\rho g^2 H^2 T}{32\pi} \left( \tanh kh + \frac{kh}{\cosh^2 kh} \right) \quad (1)$$

Cette formule donne la puissance d'une vague pour une largeur de crête de 1m. Dans la configuration expérimentale, le canal fait 40cm de largeur, il faut donc multiplier cette puissance par 0.4. De plus, le caisson étant symétrique il génère, en théorie, les mêmes

vagues de part et d'autre. Il faut donc rajouter un coefficient 2 dans la formule. On obtient finalement la formule suivante :

$$J = \frac{\rho g^2 H^2 T}{40\pi} \left( \tanh kh + \frac{kh}{\cosh^2 kh} \right) \quad (2)$$

La puissance du moteur  $P_{mot}$  est une donnée que l'on récupère via le logiciel qui pilote les variateurs. La puissance instantanée consommée par le moteur est calculée en utilisant la relation  $P = U.I$  où  $P$  est la puissance,  $U$  la tension et  $I$  l'intensité du courant. L'échantillonnage n'est pas idéal et la puissance est calculée à une fréquence de 4Hz, ce qui ne donne donc que 4 points par seconde. Il en résulte une perte de données. Finalement, la puissance consommée par le moteur est moyennée pour obtenir la puissance  $P_{mot}$ .

Finalement, le rendement s'exprime :

$$\eta = \frac{J}{P_{mot}} = \frac{\rho g^2 H^2 T}{40\pi P_{mot}} \left( \tanh kh + \frac{kh}{\cosh^2 kh} \right) \quad (3)$$

Le rendement du moteur n'est pas de 100%, et il faudrait donc en tenir compte. Cependant la documentation disponible sur le moteur n'était pas suffisamment détaillée pour permettre une estimation claire de son rendement en fonction des différents paramètres, notamment la vitesse de rotation.

### III – Résultats et analyse

#### III – 1 Forme des vagues

Avec le premier générateur testé, la qualité des vagues générées en condition de faible profondeur était assez faible comparée à celles générées par un batteur de type piston [2]. Elle était par contre satisfaisante dans des conditions de grande profondeur.

Comme le montre la figure 6, pour ce deuxième montage, la qualité des vagues est toujours satisfaisante en condition de grande profondeur (fréquence de 0.6Hz). De plus, elle ne semble pas, ou très peu, affectée par l'augmentation de la hauteur, obtenue en augmentant la vitesse de rotation et/ou l'amplitude de l'angle de pale, comme on peut s'en rendre compte en comparant les figures 6 et 7.

Comme avec le montage précédent, lorsque le rapport de la profondeur à la longueur d'onde diminue, la qualité de la houle se dégrade.. Ainsi, la figure 8 présente les mêmes paramètres de génération que pour la figure 6 (même angle de pale, même vitesse de rotation) mais la fréquence est cette fois de 0.3Hz. Les deux signaux ne sont pas clairement pas comparables en terme de qualité.

La qualité baisse encore à mesure que la hauteur augmente, via l'angle de pale ou la vitesse de rotation, comme le montre la figure 9.

Bien que les paramètres de génération (amplitude de l'angle des pales, vitesse de rotation) soient identiques, la hauteur des vagues de la figure 7 est de l'ordre de 100mm, alors que celle de la figure 9 n'est que d'environ 60mm. Ainsi, bien que la première configuration est plus non-linéaire que la seconde pour la cambrure (cf figure 10), la qualité du signal de houle est meilleur. Il semble donc difficile d'attribuer la faible qualité du signal de houle aux non-linéarités de houle.

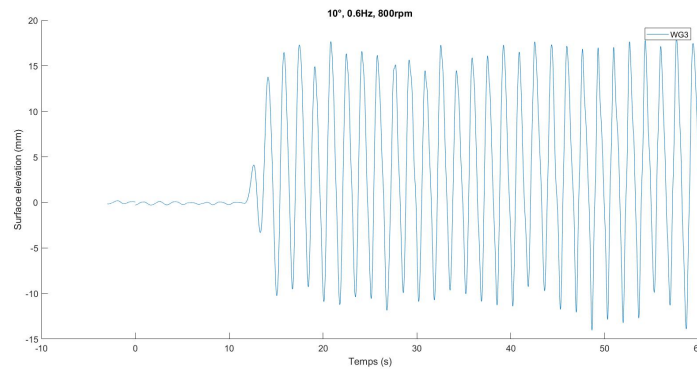


FIGURE 6 – Signal temporel de l'élévation de la surface libre pour les paramètres suivants :  $10^\circ$ , 0.6Hz, 800rpm.

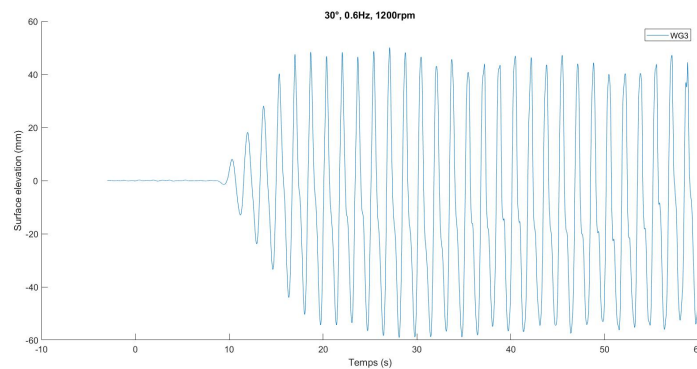


FIGURE 7 – Signal temporel de l'élévation de la surface libre pour les paramètres suivants :  $30^\circ$ , 0.6Hz, 1200rpm.

La figure 11 présente les résultats des essais pour les différentes vitesses de rotation, fréquences, et pour des angles de pale de  $10^\circ$  ou  $15^\circ$ . La hauteur de houle correspond à la hauteur du fondamental dans le signal. Elle a été obtenue par analyse harmonique de des signaux de houle mesurée dans les essais. On peut voir que la hauteur mesurée a un comportement plutôt linéaire avec la vitesse de rotation au carré. Par ailleurs, la hauteur du fondamental augmente logiquement avec l'amplitude de l'angle de pale.

### III – 2 Rendement

Le rendement du dispositif a été calculé suivant la méthodologie présentée dans la première partie. Pour la hauteur de houle dans l'équation (), la hauteur du fondamental (obtenu par analyse harmonique) est utilisé. La figure 12 montre les résultats obtenus. Les rendements affichés sont la moyenne des rendements obtenus pour des vitesses de 700 à 1200rpm. Il est remarquable qu'une fréquence particulière conduise à la maximisation du rendement. Ainsi, les rendements sont de l'ordre de 10% pour 0.4Hz, alors qu'ils ne sont que de l'ordre de 3% pour les deux autres fréquences.

On peut également remarquer sur la figure 12 que les rendements sont maximisés pour des angles compris entre  $10^\circ$  et  $15^\circ$ .

La figure 13 présente le détail des résultats expérimentaux pour la fréquence de 0.4Hz, en fonction de la vitesse de rotation du moteur et de l'amplitude de l'angle de calage



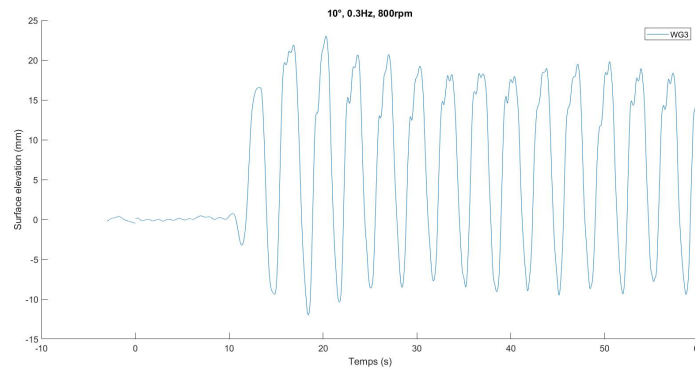


FIGURE 8 – Signal temporel de l’élévation de la surface libre pour les paramètres suivants :  $10^\circ$ , 0.3Hz, 800rpm.

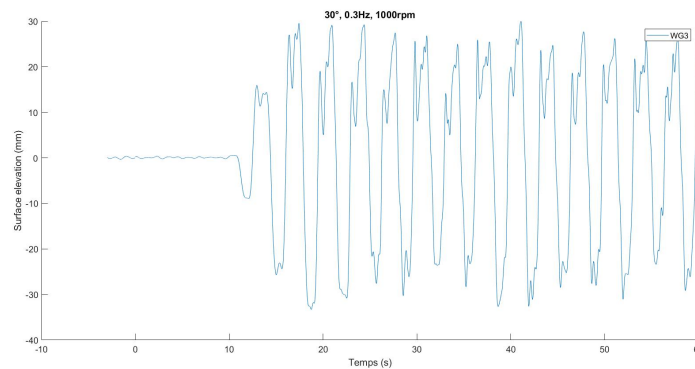


FIGURE 9 – Signal temporel de l’élévation de la surface libre pour les paramètres suivants :  $30^\circ$ , 0.3Hz, 1000rpm.

des pales.. Cette figure 13 indique que la vitesse ne joue pas un rôle prédominant pour le rendement du système. Elle peut donc être utilisée comme paramètre variable pour obtenir la hauteur de houle désirée. En effet, avec des angles de pales compris entre  $10^\circ$  et  $15^\circ$  le seul paramètre permettant de faire varier la hauteur de houle significativement est la vitesse de rotation.

La figure 14 présente la hauteur de houle en fonction du carré de la vitesse de rotation et du rendement, pour les angles de pales de 10 et 15. Comme déjà remarqué ci-dessus, on peut voir que la hauteur de vague semble augmenter linéairement avec le carré de la vitesse de rotation du moteur 14, ce qui confirme que la vitesse de rotation est un bon paramètre pour faire varier l’amplitude de la houle.

### III – 3 Set-down

Deux méthodes peuvent être utilisés pour caractériser l’amplitude de la houle. La première consiste à procéder à une analyse harmonique du signal de houle, et à retenir l’amplitude du fondamental. C’est la méthode qui a été retenue dans les figures ci-dessus. Une autre méthode consiste à évaluer directement la hauteur crête à creux à partir des résultats expérimentaux.

La figure 15 présente l’écart relatif entre les hauteurs (double de l’amplitude) obtenues avec chaque méthode, en fonction de l’angle de pale, pour la fréquence de 0.4Hz. Il apparaît que cet écart atteint environ 20%. Cette différence peut avoir une influence sur la valeur

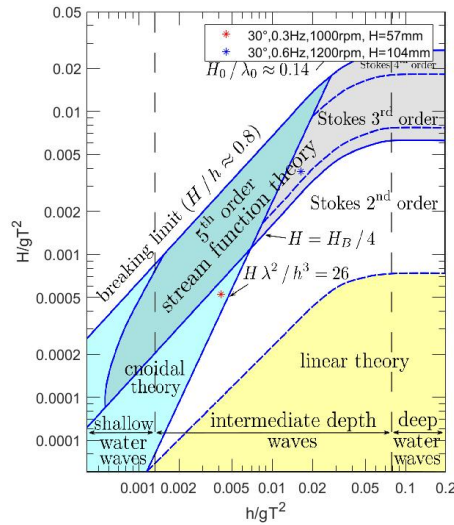


FIGURE 10 – Domaines de validité des différentes théories et placement des houles générées.

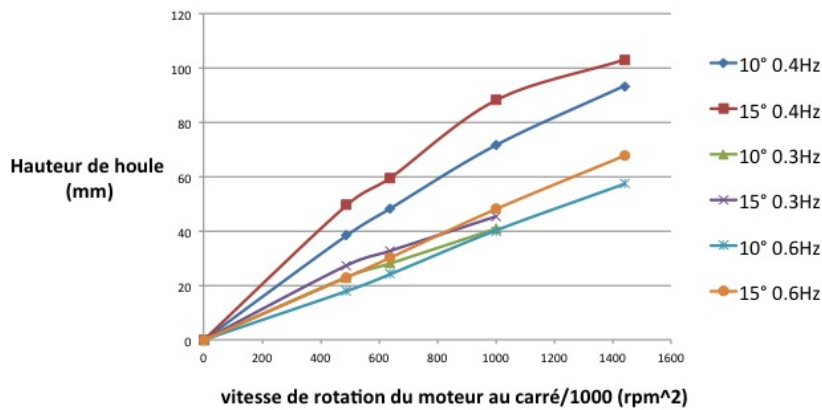


FIGURE 11 – Hauteurs fondamentales en fonction de la vitesse de rotation au carré, pour les 3 fréquences d'étude et des angles de pale de 10° ou 15°.

du rendement puisque d'après la formule 3 le rendement est fonction de la hauteur au carré. Une première raison à cette différence est la présence d'une moyenne non nulle. En effet, le terme constant dans la série de Fourier (premier terme) devrait être nul puisque la houle fait varier la position de la surface libre autour de la position initiale, qui est ramenée à 0. Or ici on observe qu'en moyenne on ne se situe plus sur cette position initiale, mais au dessus. Une phase de préparation consiste en la recherche de la position nulle des pales de l'hélice, qui correspond à la valeur d'angle pour laquelle elles ne brassent pas d'eau. Cependant, il est apparu au fur et à mesure des essais que cette position était variable, avec la vitesse notamment, et que le servomoteur n'était pas toujours capable de respecter cette consigne, du fait notamment de la présence d'un jeu mécanique. On a donc fréquemment une position moyenne des pales non nulle et donc un débit non nul, ce qui a pour effet de générer du courant et une différence de niveau entre l'avant et l'arrière du système. Cette différence de niveau demande bien évidemment de l'énergie au système, et n'est pas pris en compte dans le calcul de rendement ensuite puisque c'est de l'énergie inutilisable. Elle pourrait être une des causes du faible rendement.

La figure 16 présente le ratio  $\frac{\delta d}{H_1}$  où  $H_1$  représente la hauteur du fondamental et  $\delta d$  la

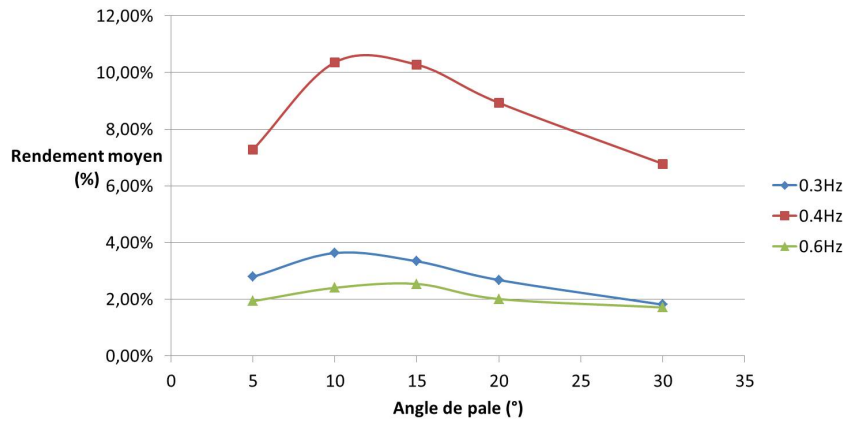


FIGURE 12 – Evolution du rendement moyen en fonction de l'angle de pale. Le rendement est la moyenne des rendements obtenus pour des vitesses de 700 à 1200rpm.

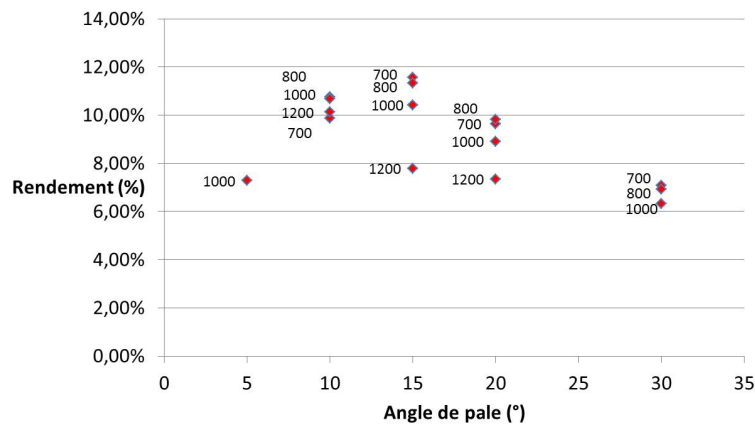


FIGURE 13 – Evolution du rendement en fonction de l'angle de pale pour une fréquence de 0.4Hz, avec les vitesses.

variation de profondeur d'eau moyenne mesurée entre le moment où le système est éteint et en marche. On remarque sur la figure que le niveau moyen semble augmenter à mesure qu'on augmente le pas de l'hélice.

On retrouve une similitude entre la figure 16 et la figure 15 qui présente l'écart relatif entre la hauteur de houle moyenne mesurée, et la hauteur moyenne du fondamental calculée par analyse harmonique. Cette similitude semble suggérer qu'une partie de l'énergie de la vague que l'on a perdue en faisant la transformée de Fourier est en fait partie dans cette variation du niveau moyen de l'eau. Cette variation du niveau moyen traduit la génération d'un courant non désiré, responsable d'une perte d'énergie.

De plus, la houle générée présente aussi des harmoniques, qui elles aussi transportent de l'énergie. Bien qu'elles soient d'amplitude de plus en plus faible à mesure que la fréquence augmente, la 2<sup>nd</sup>e harmonique est dans certains cas bien présente. Tout comme l'offset, c'est une perte d'énergie et donc une autre explication pour le faible rendement.

La différence en termes d'amplitude pour une houle du premier ordre et une houle du second ordre est significative. La formule du rendement utilisée est basée sur la théorie linéaire et utilise donc l'amplitude de la houle du premier ordre. Or après calculs il est apparu que même s'il existe des différences entre les deux types de houles, une fois la puissance calculée on se rend compte que les valeurs obtenues sont très proches. La perte

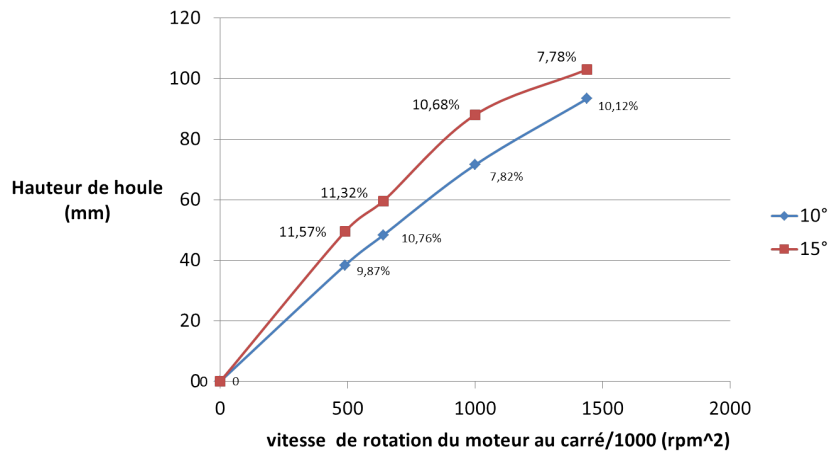


FIGURE 14 – Evolution de la hauteur de vague en fonction du carré de la vitesse de rotation pour une fréquence de 0.4Hz, avec le rendement.

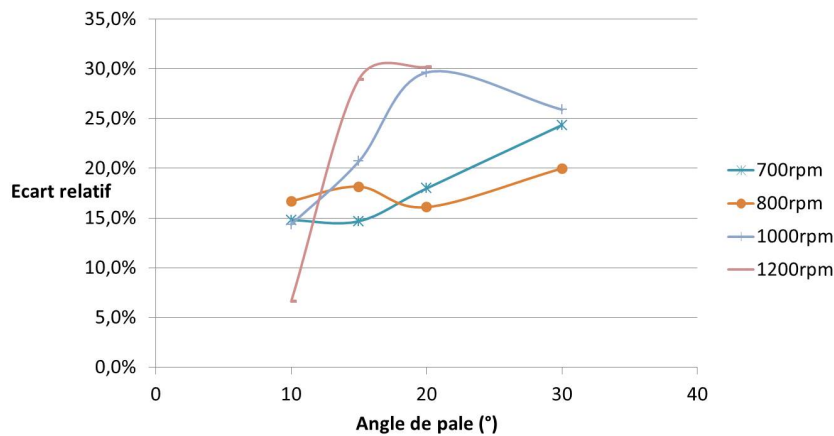


FIGURE 15 – Evolution de la différence relative entre la hauteur crête à creux et la hauteur du fondamental en fonction de l'angle de pale pour une fréquence de 0.4Hz.

de rendement ne peut donc pas être justifiée par l'approximation d'une houle linéaire.

## IV – Conclusion

Les essais menés durant les étés 2017 et 2018 ont pu mettre à nouveau en évidence les capacités du système à générer de la houle, ainsi que les améliorations apportées par le nouveau système, faisant passer le rendement de 4% à 11%. Il a de plus été mis en évidence les différentes sources potentielles de perte d'énergie, comme la génération non désirée d'un courant ainsi que d'harmoniques.

Afin d'améliorer le rendement, des améliorations sont possibles. Tout d'abord, la méthode de calcul du rendement peut être améliorée. En effet, l'acquisition de la puissance du moteur se fait avec un échantillonnage de 4Hz, ce qui est assez faible. Une perte d'informations est possible, et donc une mauvaise évaluation du rendement. Une méthode plus performante de mesure de cette puissance électrique aiderait à calculer le rendement plus fidèlement.

Ensuite, nous avons vu qu'il y avait une génération de courant, ce qui est assurément une perte d'énergie et est donc responsable en partie du faible rendement. En rendant le

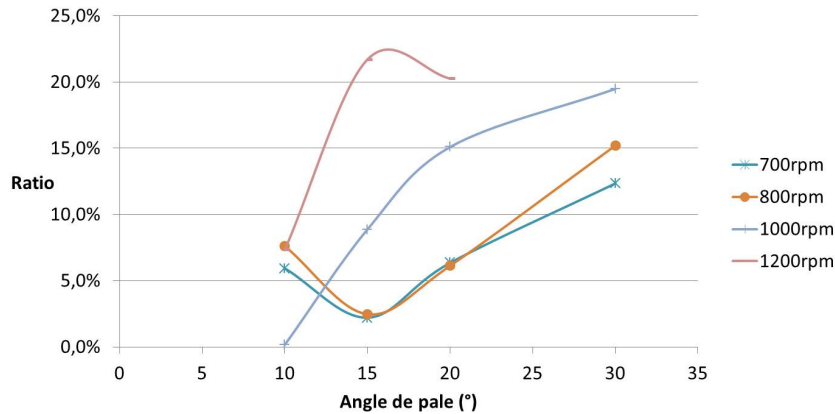


FIGURE 16 – Evolution du niveau moyen en fonction de l’angle de pale pour une fréquence de 0.4Hz.

système plus robuste et en diminuant le jeu (meilleur servomoteur, meilleurs composants mécaniques), il en résulterait un meilleur suivi de consigne et donc une diminution des pertes énergétiques.

Le profil de pale est un élément clé dans la réalisation d’une hélice. Pour la suite, il serait intéressant d’étudier plus en détail cet aspect. Une étude numérique pourrait aider à déterminer le profil optimal, et ainsi faire augmenter le rendement.

La présence du nid d’abeille pour redresser l’écoulement peut aussi être à l’origine d’une perte d’énergie à cause des pertes de charge. Une étude plus approfondie à ce niveau pourrait permettre de déterminer l’impact du nid d’abeille et d’étudier des solutions alternatives permettant un meilleur rendement.

Le moteur utilisé ne disposait pas de données permettant de bien chiffrer le rendement moteur dans les essais effectués. Il semblerait cependant que le régime moteur utilisé pendant les essais ne correspondait pas exactement à la zone de confort du moteur choisi, ce qui pourrait se traduire par des pertes énergétiques importantes.. Une étude du moteur et un redimensionnement pourraient aider à faire augmenter significativement le rendement. Une campagne d’essais plus importante pourrait aussi permettre d’identifier les zones des paramètres qui maximisent le rendement avec plus de précision. De plus, des paramètres comme la profondeur d’eau ou l’inclinaison du système (il est à l’horizontal dans notre cas) n’ont pas été étudiés et ont vraisemblablement un impact sur le comportement du dispositif.

## Références

- [1] A. Babarit and S. Delvoye. Système de generation de vagues dans un bassin. brevet wo 2016131992 a1. 2016.
- [2] A. Babarit S. Delvoye V. Arnal L. Davoust J. Wackers F. Bonnefoy. Wave and current generation in wave flumes using axial-flow pumps. Trondheim, Norvège, 2017. In Proc. of the ASME 2017 International Conference on Ocean, Offshore & Arctic Engineering (OMAE2017).
- [3] Zhang H. and Schaffer H. *Approximate stream function wavemaker theory for highly non-linear waves in wave flumes*. Ocean engineering, 2007.