

**VALIDATION EXPERIMENTALE DU PRINCIPE DU VOILIER-
HYDROLIENNE POUR LA RECUPERATION DE L'ENERGIE DU VENT EN
HAUTE MER**

A. Babarit^{(1)*}, N. Abdul Ghani^{(1),(2)}, E. Brouillette⁽¹⁾, S. Delvoye⁽¹⁾, M. Weber⁽¹⁾, A. Merrien⁽¹⁾, J. Templai⁽¹⁾, V. Frémont⁽³⁾, M. Michou⁽⁴⁾, S. Bourguet⁽⁵⁾, J-C. Gilloteaux⁽¹⁾

⁽¹⁾ LHEEA, Ecole Centrale de Nantes - CNRS, Nantes, France

⁽²⁾ Universiti Pertahanan Nasional Malaysia, Kuala Lumpur, Malaysia

⁽³⁾ LS2N, Ecole Centrale de Nantes – CNRS, Nantes, France

⁽⁴⁾ Watt&Sea, La Rochelle, France

⁽⁵⁾ IREENA, Université de Nantes, Saint-Nazaire, France

* Corresponding author: aurelien.babarit@ec-nantes.fr

Résumé

Le voilier-hydrolienne est un concept pour la récupération de l'énergie du vent en mer encore très peu exploré. En particulier, il n'a encore fait l'objet d'aucune étude expérimentale. Pour pallier ce manque, une plateforme expérimentale a été développée à Centrale Nantes. Elle consiste en un catamaran de 5.5 m de long équipé d'un hydro-générateur muni d'une hélice de 240 mm de diamètre. Des essais ont été réalisés sur l'Erdre en juillet 2019. Les résultats confirment l'importance d'optimiser la trainée induite par l'hydrogénérateur pour maximiser la production d'énergie ; et que le principe du voilier-hydrolienne permet de produire des quantités significatives d'énergie.

Summary

The energy ship is a concept for offshore wind energy capture which has received very little attention until today. Particularly, there had not been yet an experimental proof-of-concept. In order to address this issue, an experimental platform has been developed at Centrale Nantes. It consists in a 5.5 m long catamaran equipped with a 240 mm diameter water turbine. The platform was tested in July 2019 on the river Erdre (France). Results show that it is essential to optimize the water turbine induced drag in order to maximize energy production; and that the energy ship concept is able to produce significant amounts of energy.

1 INTRODUCTION

Depuis 2017, le LHEEA étudie le concept du voilier-hydrolienne pour la récupération de l'énergie du vent en mer. Ce concept consiste en un navire propulsé par le vent, sous lequel est fixé un ou plusieurs hydro-générateurs produisant de l'électricité à partir du courant-vitesse (Figure 1). L'électricité produite est stockée à bord, soit dans des batteries, soit sous forme de carburant (hydrogène, ammoniac, méthanol, etc. [1]).

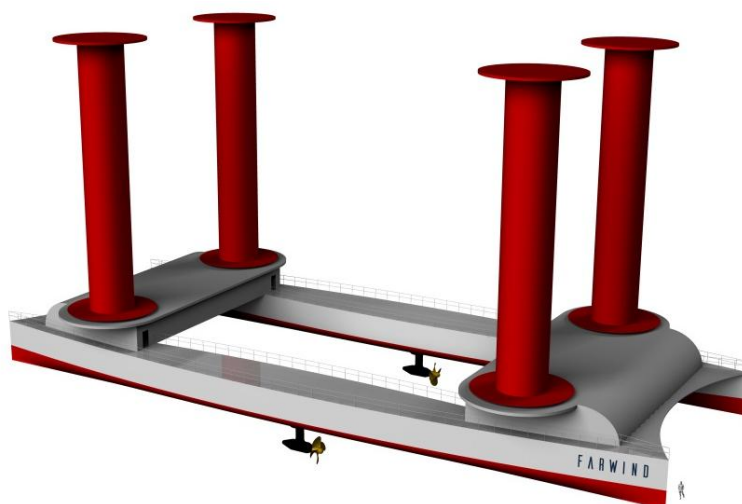


Figure 1. Vue d'artiste d'un voilier-hydrolienne de 80m équipé de quatre rotors Flettner pour la propulsion et deux hydrogénérateurs pour la conversion du vent vitesse en électricité.

L'intérêt de ce concept est de pouvoir récupérer l'énergie du vent en haute mer, ce qui semble difficilement envisageable avec des éoliennes flottantes plus conventionnelles en raison des coûts du raccordement, d'installation et d'exploitation qui augmentent considérablement avec la distance au rivage, (Figure 2).

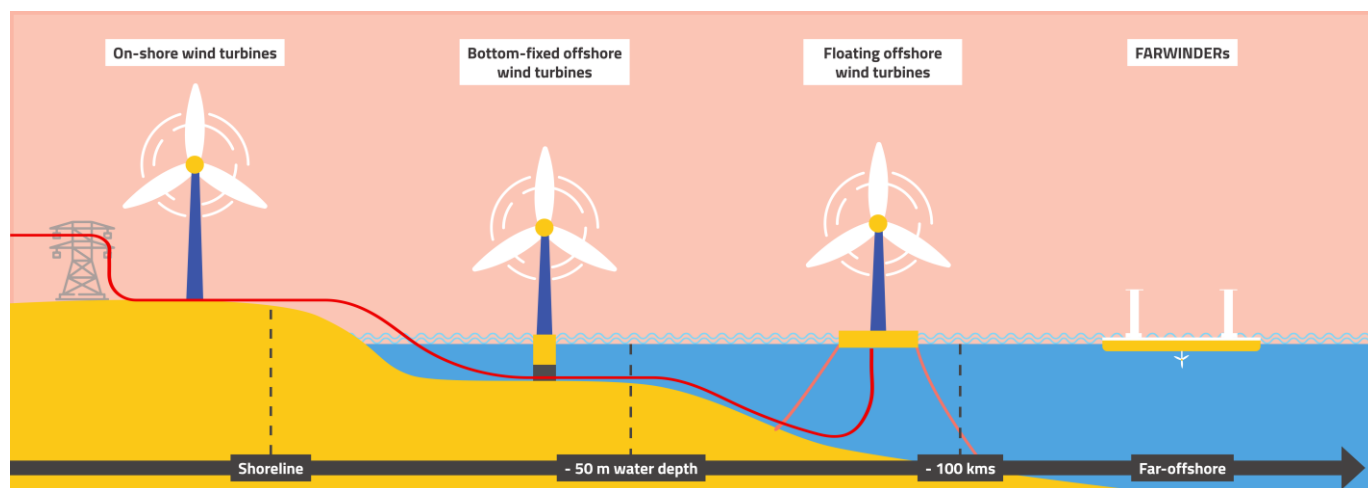


Figure 2. Illustration de la complémentarité des voiliers-hydroliennes avec les éoliennes pour la récupération de l'énergie du vent.

Le concept du voilier-hydrolienne a été breveté en 1982 [2]. Cependant, il n'a fait l'objet que de très peu d'études scientifiques et techniques [3] -[9]. Tous ces travaux ont été réalisés sur la dernière dizaine d'années, et ce sont cantonnées à des études théoriques et numériques. Ainsi, jusqu'à la présente étude, le principe de fonctionnement du voilier-hydrolienne n'avait pas encore été validé expérimentalement.

Par ailleurs, plusieurs de ces études indiquent qu'un paramètre clé pour maximiser la récupération d'énergie est la trainée induite par l'hydrogénérateur [5] [11]. En effet, la puissance absorbée par

l'hydrogénérateur est égale au produit de la trainée induite multipliée par la vitesse de l'écoulement dans le disque hélice. Si la trainée induite est très grande, alors la vitesse du voilier est très petite, et la puissance absorbée tend vers zéro. Inversement, si la trainée est très petite, la vitesse du voilier tend vers la vitesse sans production d'énergie, mais la puissance absorbée tend également vers zéro. Entre ces deux extrêmes, il existe donc un optimum, et nous avons montré dans [14] qu'il pouvait être significativement différent de l'optimum de Betz (en raison du fait que la vitesse de l'écoulement – le courant-vitesse - dépend de la trainée induite).

Dans la continuité de ces travaux, l'étude présentée ici a visé d'une part à étudier expérimentalement l'effet de la trainée sur la production d'énergie et d'autre part de confirmer que des quantités significatives d'énergie peuvent être produites avec le principe du voilier-hydrolienne. La plateforme expérimentale spécialement développée pour ce faire est décrite dans la section 2. Les essais sont décrits dans la section 3.

2 DESCRIPTION DE LA PLATEFORME EXPERIMENTALE

Un catamaran Hobie Cat Tiger a servi de base pour la plateforme expérimentale (Figure 3). Sa longueur de coque est 5.51 m. Le gréement est constitué d'une grande voile de 17 m² et d'un foc de 3.45 m². Son équipage est constitué de deux personnes. Ce type de catamaran a été sélectionné pour sa faible trainée hydrodynamique (ce qui est essentiel pour maximiser la production d'énergie [5] [10]), son coût modeste sur la marché de l'occasion, et parce qu'il correspond assez bien à une version à l'échelle 1/14 du voilier-hydrolienne décrit dans [14].



Figure 3. Photo de la plateforme expérimentale avant essais.

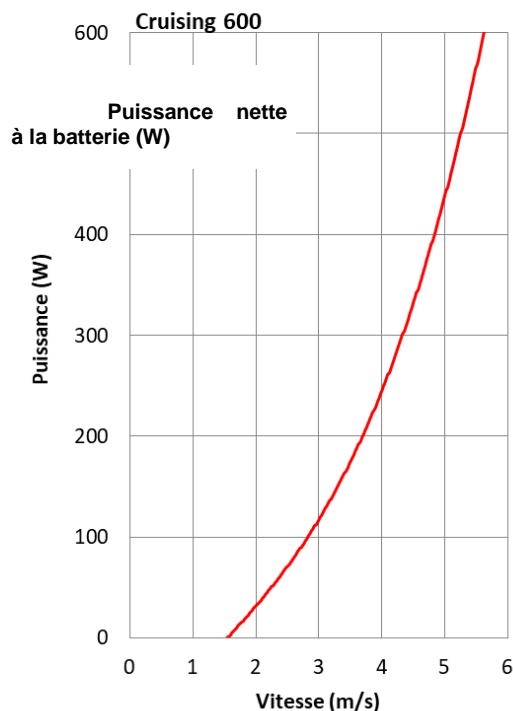


Figure 4. Performances du Cruising 600

Ce catamaran a été équipé d'un hydrogénérateur Watt & Sea Cruising 600. Le diamètre de l'hélice est 240 mm. D'après le fournisseur, cette configuration permet la production de 250 W de puissance électrique pour une vitesse de navire de 4 m/s (Figure 4).

L'un des objectifs de la campagne expérimentale étant d'étudier la relation entre la trainée induite par l'hydrogénérateur et la production d'énergie, l'hydrogénérateur est monté sur une balance d'efforts. La balance a été conçue et réalisée au LHEEA (Figure 5). Elle est constituée de trois jauges de contraintes

HBM Z6 montées entre deux plaques d'aluminium. Après calibration, elle a été fixée sur la poutre arrière. Sa précision est estimée à 0.4% pour l'effort horizontal.

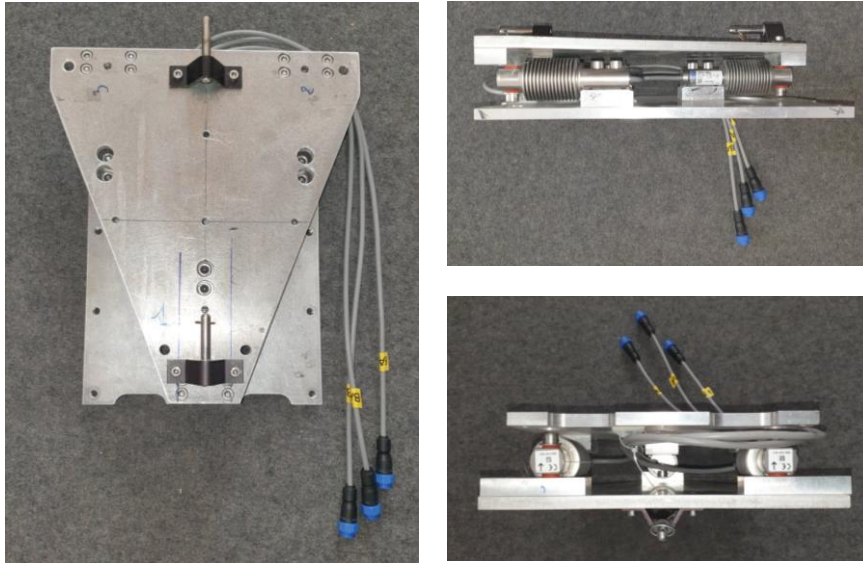


Figure 5. Balance d'efforts

L'hydrogénérateur est relié à un convertisseur connecté à une batterie et une résistance de décharge pour dissiper l'excédent d'énergie sous forme de chaleur. L'ensemble a été intégré dans un espace aménagé dans le flotteur tribord. Pour l'expérience, le fabricant Watt&Sea a modifié la boucle de régulation interne du convertisseur (qui normalement cherche à extraire le maximum de puissance de l'hydrogénérateur) pour une régulation portant sur la tension de la génératrice. Cette régulation permet d'imposer une certaine tension à la sortie de la génératrice, indépendamment de la tension batterie, et ainsi de piloter le courant de la génératrice et donc le couple résistif à l'arbre, la traînée et la production d'énergie. Pour une tension de sortie de 50V, l'hélice est quasiment en roue libre (la traînée et la production d'énergie sont faibles). Abaisser la tension (jusqu'à 10V) a pour conséquence l'augmentation du couple au niveau de l'arbre, faisant augmenter la production d'énergie, mais aussi la traînée. Cet ensemble est équipé de capteurs permettant de mesurer la production d'énergie (tension, courant, puissance) et la vitesse de rotation de la turbine. Le couple à l'arbre (P_{shaft}) est estimé par un algorithme à partir du courant de sortie du générateur.

L'ensemble Hydrogénérateur/hélice/Balance d'effort a été caractérisé en bassin. Les résultats sont présentés en annexe.

Pour la mesure du vent, un anémomètre à ultrasons CV7-LCJ a été installé en tête de mat. Le Hobie Cat Tiger étant équipé d'un mat-aile tournant, un capteur d'angle de mat a été positionné en pied de mat afin de pouvoir corriger la mesure d'angle de vent.

Le système de contrôle et d'acquisition de données est basé sur un ordinateur Raspberry Pi 3 intégré dans une valise étanche (Pelicase) sur le pont du flotteur tribord. Il est relié aux différents capteurs par des liaisons filaires. Le logiciel d'acquisition a été développé au LHEEA en langage Python. Il permet l'enregistrement des mesures dans un fichier ASCII dans une carte mémoire à bord de la plateforme, ainsi que la transmission en continu des signaux mesurés par liaison Wi-Fi via une antenne placée en tête de mat. Cette fonctionnalité permet à l'équipe à terre de suivre les essais via une interface graphique et de donner des instructions à l'équipage. La liaison Wi-Fi permet également de piloter et modifier le réglage de l'hydrogénérateur à distance (et donc la traînée), ce qui permet à l'équipage à bord du catamaran se focaliser sur la navigation.

3 ESSAIS

3.1 Méthodologie

Les essais ont été réalisés le 2 juillet 2019 sur l'Erdre à partir du Club Nautique de Mazerolles, dans des conditions de vent léger (1 à 7 m/s), et sans courant. L'hélice utilisée lors de cette campagne était l'hélice standard Watt&Sea 240mm, immergée à 520mm de la surface. La méthodologie expérimentale a consisté en des séries d'aller-retour au vent de travers (voir exemple en Figure 6). En effet, cette allure est celle pour laquelle la performance des voiliers-hydroliennes est maximale [10]. A chaque aller-retour, le réglage du contrôle l'hydrogénérateur a été modifié dans le but d'étudier son effet sur la production d'énergie. Le contrôle à distance de l'hydrogénérateur a permis à l'équipage de se concentrer sur le respect de la consigne de rester au vent de travers.

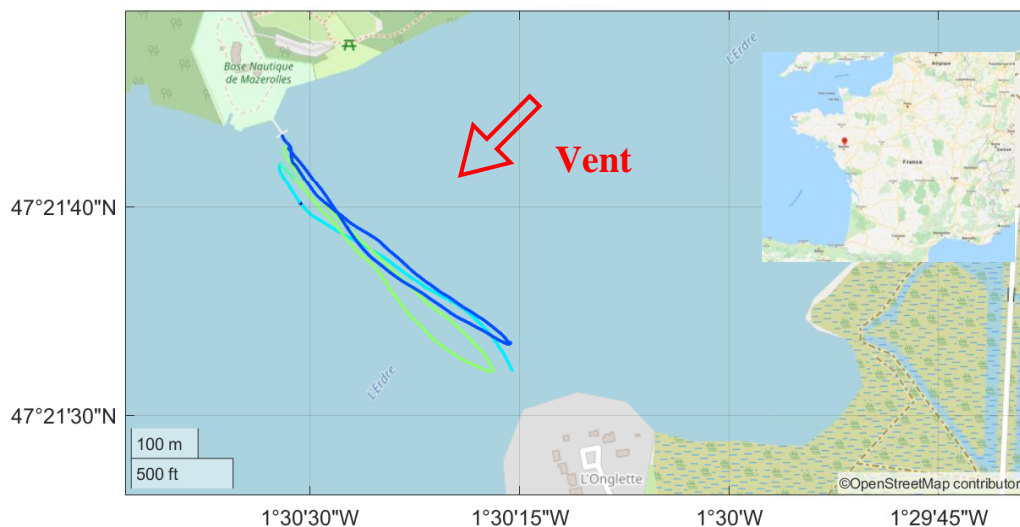


Figure 6. Exemple de trajectoire GPS mesurée pendant les essais. Les couleurs indiquent le réglage de l'hydrogénérateur. Images de fonds et carte : OpenStreetMap.

Quatre enregistrements exploitables ont été obtenus (Run02, Run03, Run04, Run05, Voir Figure 7). Sur ces quatre enregistrements, un total de dix-sept passages ont été réalisés.

3.2 Analyses effectuées

La Figure 8 montre les signaux enregistrés pendant le Run02. On peut voir que les signaux présentent des variations assez importantes. Elles sont liées d'une part aux imprécisions dans la conduite du navire par l'équipage, mais aussi et surtout aussi aux variations importantes du vent sur la zone d'essai (plan d'eau intérieur). Afin de limiter les incertitudes, les dix-sept passages ont été dépouillés un par un afin d'identifier des intervalles de mesure pendant lesquels les signaux expérimentaux étaient stabilisés (zones grisées sur la Figure 8). Les signaux ont ensuite été moyennés sur chacun de ces intervalles. Les écarts-types ont aussi été calculés afin de conserver un indicateur de la qualité des données.

La Figure 9 représente les angle de vent moyen et les écarts-types obtenus par ce processus pour les dix-sept passages. Par la suite, seuls les passages pour lesquels l'angle au vent réel moyen était compris entre 80° et 100° ont été retenus (les quatre passages dont l'angle au vent réel moyen est hors de l'intervalle $[80^\circ, 100^\circ]$ ont été écartés).

La Figure 10 représente la vitesse moyenne du catamaran en fonction de la vitesse moyenne du vent réel et de la tension de l'hydrogénérateur. La vitesse du vent moyen sur les plages de données retenues s'échelonnaient entre 2.5 et 5.0 m/s. On peut noter qu'une bonne approximation de la vitesse du navire est la moitié du vent réel lorsque l'hydrogénérateur est en fonctionnement.

Les coefficients de traînée et de puissance ont été calculés. Le coefficient de traînée est défini comme étant le rapport entre la traînée mesurée de l'hélice sur la pression dynamique exercée sur un disque de diamètre équivalent (240 mm pour nos essais).

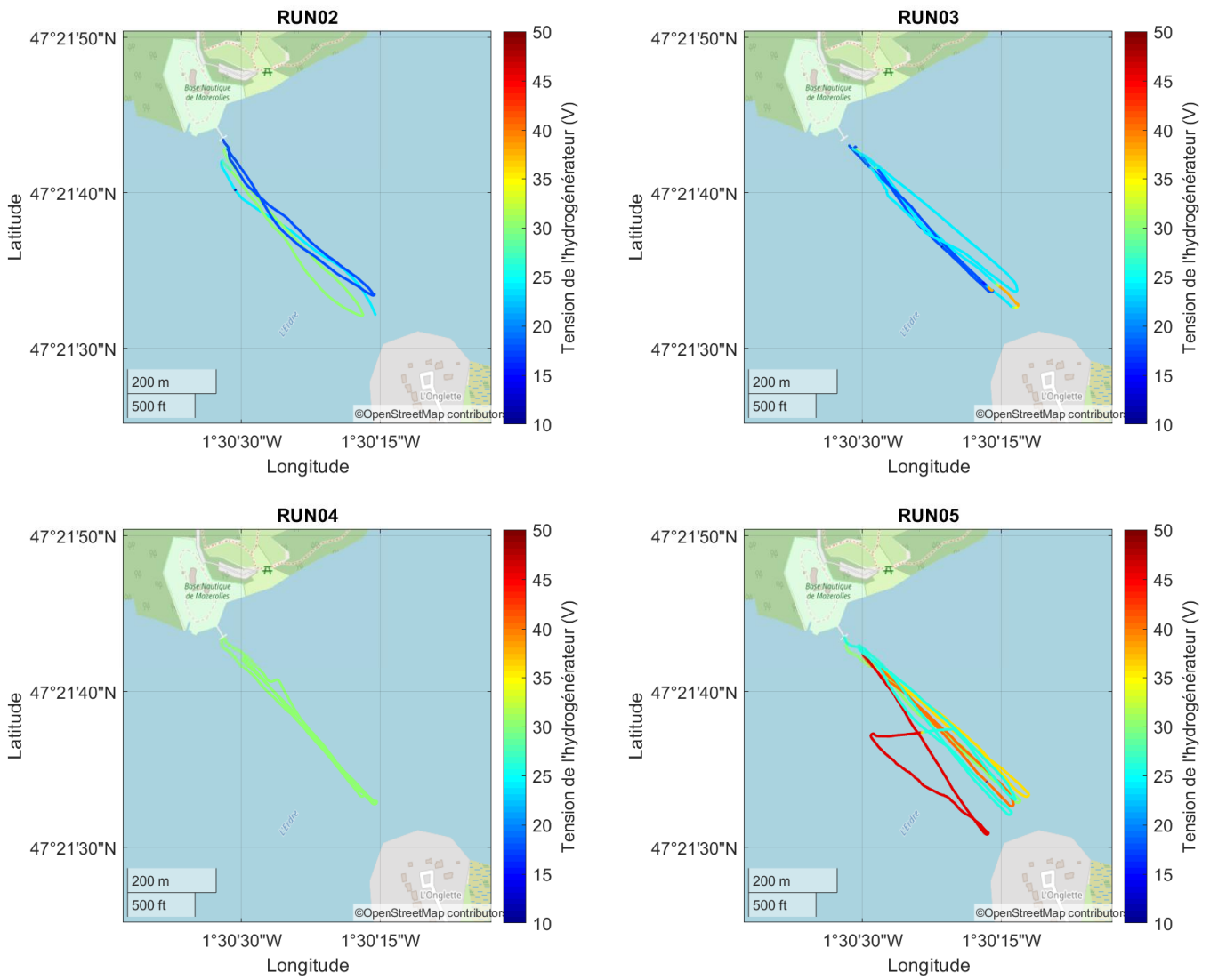


Figure 7. Ensemble des trajectoires réalisées

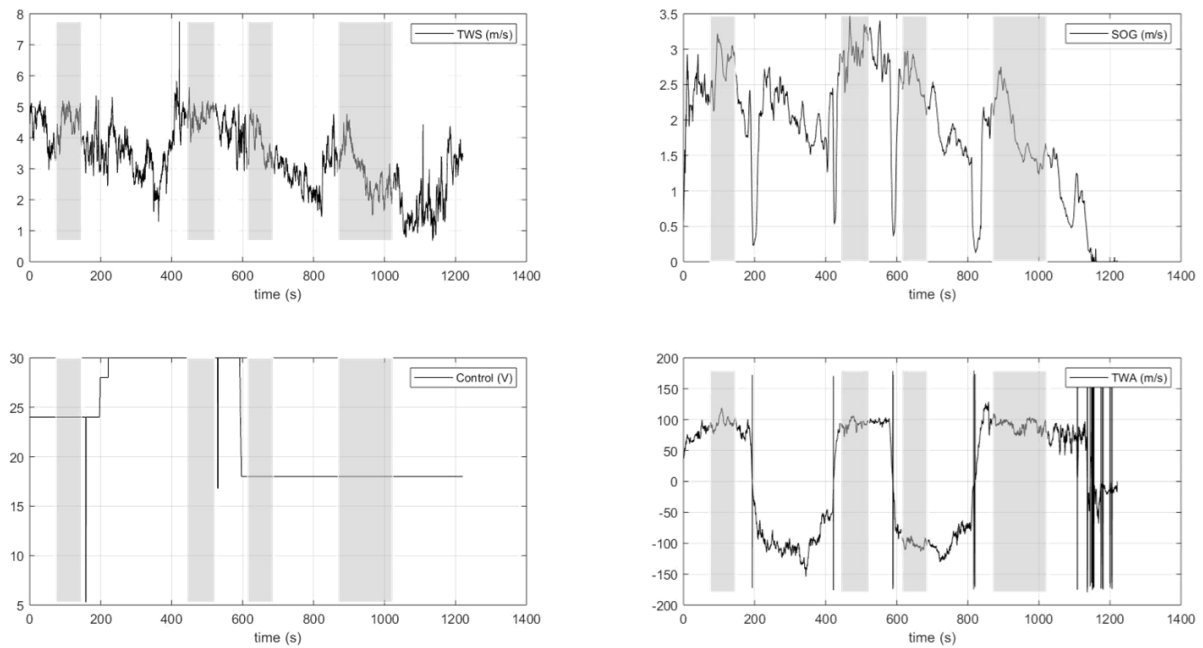


Figure 8. Exemple des signaux bruts enregistrés pendant le Run02. Les zones grisées correspondent aux plages de données retenues pour analyse.

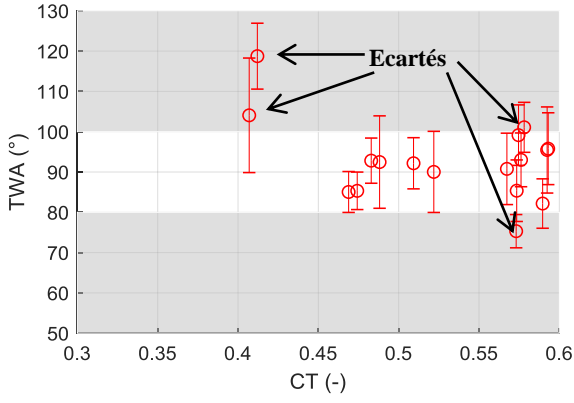


Figure 9. Validation des données

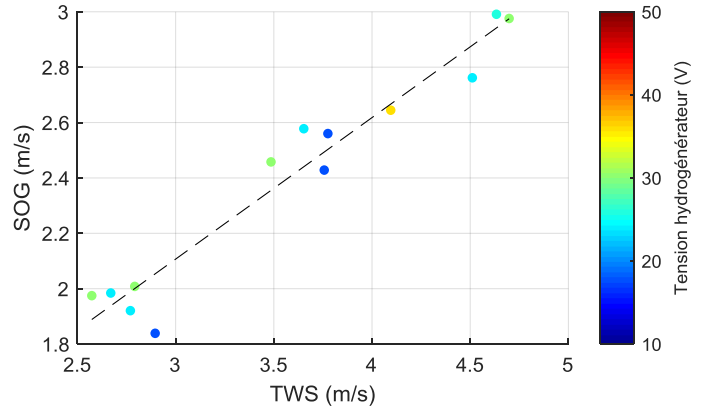


Figure 10. Vitesse du bateau (SOG) en fonction du vent (TWS), avec hydrogénérateur en fonctionnement ($SOG \approx 0.5110 \times TWS + 0.5738$)

$$C_T = \frac{D_{net}}{\frac{1}{2}\rho_{eau}S_{Turbine}SOG^2} \quad (1)$$

Où D_{net} est la traînée mesurée par la balance, ρ_{eau} est la masse volumique de l'eau, $S_{Turbine}$ est le diamètre du rotor de l'hydrogénérateur, et SOG est la vitesse du catamaran (mesurée par le GPS).

Le coefficient de puissance est défini comme étant le rapport entre la puissance mécanique au niveau de l'arbre sur la puissance disponible. Deux méthodes sont envisagées pour définir la puissance disponible :

- Soit au niveau de la turbine (la ressource est de courant vitesse) : $C_{P_{SOG}}$
- Soit au niveau des voiles (la ressource est le vent) : $C_{P_{TWS}}$

Le coefficient $C_{P_{SOG}}$ s'appuie sur la vitesse d'avance du navire (SOG) et la surface du disque hélice comme surface de référence. Elle correspond à l'approche classique pour la caractérisation de la performance énergétique d'un hydrogénérateur.

$$C_{P_{SOG}} = \frac{P_{Shaft}}{\frac{1}{2}\rho_{eau}S_{Turbine}SOG^3} \quad (2)$$

Avec P_{Shaft} la puissance mécanique sur l'arbre de l'hydrogénérateur. Elle est déduite de la mesure du courant en sortie de la génératrice et la vitesse de rotation à l'aide d'abaques.

Cette approche ne nous semble pas pleinement satisfaisante pour le voilier-hydrolienne car elle ne prend pas en compte la source initiale d'énergie qui est le vent. On définit alors le nouveau coefficient :

$$C_{P_{TWS}} = \frac{P_{Shaft}}{\frac{1}{2}\rho_{air}S_{Voiles}TWS^3} \quad (3)$$

Où la vitesse de référence est la vitesse de vent réel au moment de l'essai (TWS), la surface de référence est celle des voiles du catamaran ($S_{Voiles} = 20.45 \text{ m}^2$) et ρ_{air} est la masse volumique de l'air.

3.3 Résultats des analyses

Le Tableau 1 présente la synthèse de l'analyse des résultats expérimentaux. Les données pour chaque ligne correspondent à la moyenne des signaux expérimentaux sur les intervalles retenues pour analyse (voir Figure 8).

Une synthèse des coefficients de traînée et de puissance est présentée en fonction du réglage de l'hydrogénérateur sur la Figure 11.

Sur le graphe de gauche, on voit que le coefficient de traînée varie de façon inversement proportionnel à la tension de l'hydrogénérateur, ce qui est cohérent avec son fonctionnement (roue libre à 50 V et couple maximal à 10 V). On remarque également que la plage de variation du coefficient de traînée est relativement limitée, puisqu'il ne baisse que de 20% lorsque la tension de l'hydrogénérateur passe de 18 à 36 V. Si la plage de variation complète de la tension avait été utilisée, le coefficient de traînée aurait pu varier d'environ 40%.

Passage	Run	TWS (m/s)	TWA (°)	SOG (m/s)	Réglage (V)	CT	CP_TWS
1	3	3.77 (0.20)	82.2 (6.1)	2.56 (0.14)	18	0.590 (0.034)	0.138 (0.027)
2	4	2.57 (0.43)	85.0 (5.1)	1.97 (0.21)	30	0.469 (0.053)	0.272 (0.100)
3	4	2.79 (0.48)	85.3 (4.7)	2.01 (0.14)	30	0.474 (0.057)	0.238 (0.086)
4	3	3.65 (0.63)	85.4 (7.6)	2.58 (0.29)	24	0.573 (0.058)	0.221 (0.083)
5	3	2.77 (0.63)	90.0 (10.0)	1.92 (0.27)	24	0.522 (0.050)	0.226 (0.144)
6	2	2.90 (0.74)	90.8 (8.9)	1.84 (0.44)	18	0.567 (0.071)	0.143 (0.512)
7	5	4.10 (0.29)	92.2 (6.4)	2.64 (0.23)	36	0.509 (0.052)	0.195 (0.048)
8	3	2.67 (0.53)	92.5 (11.5)	1.98 (0.37)	24	0.488 (0.056)	0.224 (0.100)
9	5	3.49 (0.25)	92.8 (5.6)	2.46 (0.15)	30	0.483 (0.044)	0.224 (0.046)
10	2	4.70 (0.59)	93.0 (6.7)	2.98 (0.22)	30	0.576 (0.051)	0.186 (0.046)
11	5	4.63 (0.95)	95.5 (10.7)	2.99 (0.47)	26	0.592 (0.045)	0.180 (0.050)
12	2	4.51 (0.43)	95.8 (8.9)	2.76 (0.28)	24	0.593 (0.045)	0.142 (0.037)
13	3	3.76 (0.64)	99.1 (7.5)	2.43 (0.35)	18	0.575 (0.048)	0.120 (0.033)

Tableau 1. Résultats expérimentaux. Les valeurs entre parenthèses sont les écarts-types.

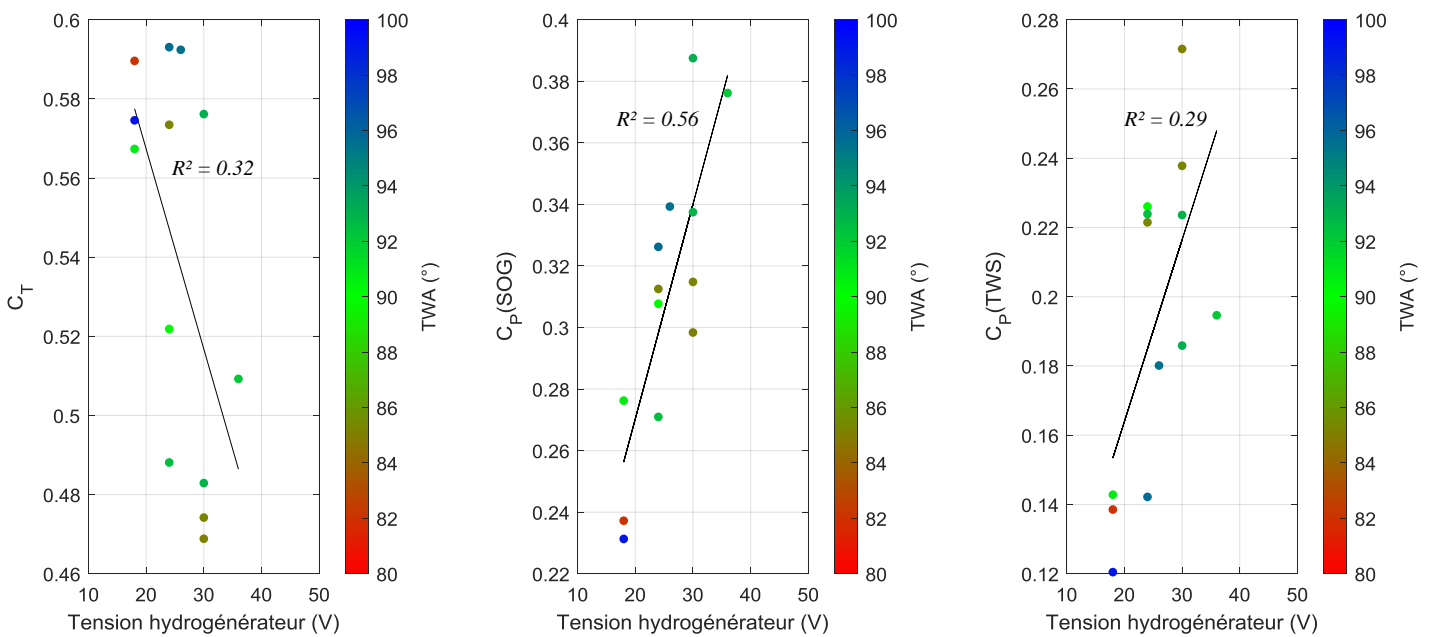


Figure 11. C_T et C_p en fonction du réglage de tension d'alimentation de l'hydrogénérateur et de l'angle de vent réel (TWA).

Sur le graphe du milieu et le graphe de droite, on voit que, comme attendu, faire varier le réglage de de l'hydrogénérateur - et donc la traînée - a un effet sur la production d'énergie. Pour la gamme de réglages testés, la production d'énergie semble augmenter linéairement avec la tension de l'hydrogénérateur (réduction de la traînée). Malheureusement, les résultats expérimentaux ne permettent pas de déterminer quelle est la valeur de la traînée optimale pour ce prototype (puisque la production maximale est obtenue pour la borne maximale de l'intervalle de tests). Des essais complémentaires avec des réglages de tension plus élevés seraient nécessaires, et/ou avec une hélice plus petite puisque l'effet d'augmenter la tension de l'hydrogénérateur est de réduire la traînée.

3.4 Extrapolation des résultats

A partir des résultats expérimentaux, on peut extrapoler les performances énergétiques pour un démonstrateur à pleine échelle. On a retenu l'échantillon #3 plutôt que l'échantillon #2 pour cette extrapolation (cf Tableau 1) car l'échantillon #2 nous semble présenter une déviation trop significative par rapport au reste des données. On considère un facteur d'échelle 14, qui permet de s'approcher du voilier-hydrolienne illustré en Figure 1. Pour le réglage de l'hydrogénérateur, on suppose que l'hydrogénérateur à pleine échelle permet d'obtenir les mêmes couples (C_T, C_P) que dans les essais. Ainsi, le réglage qui permet de maximiser la production d'énergie est $C_P(TWS) = 0.238$ pour $C_T = 0.474$.

Les données extrapolées sont présentées dans le Tableau 2.

Pour la production d'énergie (puissance sur l'arbre), deux valeurs ont été calculées, l'une sans prendre en compte la différence du nombre de Reynolds entre l'échelle 1/14 et l'échelle 1, et l'autre en la prenant en compte. Le premier cas correspond à l'application directe de l'échelle de Froude. Dans le second cas, on prend en compte l'effet de distorsion d'échelle. En effet, à l'échelle maquette, la force de trainée de la coque peut s'écrire :

$$R_{W,1:14} = \frac{1}{2} \rho_{eau} S_{W,1:14} C_{W,1:14} U_{1:14}^2 \quad (4)$$

Avec ρ la masse volumique de l'eau, $C_{W,1:14}$ le coefficient de trainée, et $U_{1:14}$ la vitesse d'avance. Comme la vitesse d'avance était modérée dans les essais ($F_n \sim 0.27$) et comme la coque est constituée de deux flotteurs très fins, on peut négliger la composante associée à la résistance de vagues par rapport à la composante visqueuse. Cela revient à considérer que le coefficient total $C_{W,1:14}$ est à peu près égal au coefficient de frottement visqueux $C_{f,1:14}$. Or, d'après l'ITTC [14], on peut écrire :

$$C_f = \frac{0.075}{(\log_{10} Re - 2)^2} \quad (5)$$

L'application de cette formule montre que le coefficient de frottement est de l'ordre de 0.0029 à l'échelle 1/14^e, alors qu'il serait de 0.0016 à l'échelle 1. L'application directe de l'échelle de Froude conduit donc à surestimer la résistance de coque à pleine échelle de jusqu'à plus de 80%.

Estimons alors le gain d'énergie qui pourrait d'être produite à l'échelle 1. Notons ΔR_W la différence de force de trainée due à la coque entre l'extrapolation en utilisant l'échelle de Froude et la force de trainée estimée en prenant en compte l'effet du nombre de Reynolds :

$$\begin{aligned} \Delta R_W &= 14^3 R_{W1:14} - \frac{1}{2} \rho S_{W,1:1} C_{W,1:1} U_{1:1}^2 \\ \Delta R_W &= 14^3 \left(R_{W1:14} - \frac{1}{2} \rho S_{W,1:14} C_{W,1:1} U_{1:14}^2 \right) \end{aligned} \quad (6)$$

Pour estimer la puissance produite en prenant cet effet en compte, on repart de l'équation du mouvement du navire à l'équilibre :

$$T = R_W + R_{WT} \quad (7)$$

Où T est la poussée fournie par les voiles et R_{WT} est la trainée induite par l'hydrogénérateur. Cette dernière peut donc s'écrire :

$$R_{WT} = T - R_W \quad (8)$$

En particulier, à l'échelle 1 :14 :

$$R_{WT,1:14} = T_{1:14} - R_{W1:14} \quad (9)$$

Et à l'échelle 1:

$$R_{WT,1:1} = T_{1:1} - R_{W1:1} \quad (10)$$

Pour la poussée aérodynamique, le nombre de Reynolds à l'échelle 1 :14 est de l'ordre de 10^5 contre 10^6 pour l'échelle 1. L'écoulement est pleinement turbulent et on peut donc supposer qu'il n'y a pas de distorsion d'échelle, donc :

$$R_{WT,1:1} = 14^3 T_{1:14} - R_{W1:1} \quad (11)$$

En injectant l'équation (9) :

$$R_{WT,1:1} = 14^3 (R_{WT,1:14} + R_{W1:14}) - R_{W1:1} \quad (12)$$

Soit, en négligeant la résistance de vagues :

$$R_{WT,1:1} = 14^3 \left(R_{WT,1:14} + \frac{1}{2} \rho S_{W,1:14} C_{f,1:14} U_{1:14}^2 \right) - \frac{1}{2} \rho S_{W,1:1} C_{f,1:1} U_{1:1}^2$$

$$R_{WT,1:1} = 14^3 \times \frac{1}{2} \rho \left(\frac{\pi}{4} D_{1:14}^2 C_T + S_{W,1:14} (C_{f,1:14} - C_{f,1:1}) \right) U_{1:14}^2 \quad (13)$$

L'application numérique de cette dernière équation montre que la trainée induite par l'hydrogénérateur doit être augmentée de 80% pour que la vitesse du navire à l'échelle 1 soit à l'échelle par rapport à celle du navire à l'échelle 1 :14. Comme la puissance produite est proportionnelle à cette trainée, on peut considérer qu'elle est aussi augmentée de 80%. Par force 5-6 (10.5 m/s) le navire FARWIND est donc capable de produire presque 1 MW, ce qui est cohérent avec les prédictions dans [10].

		Essais (1/14)	Echelle 1
Longueur	<i>m</i>	5.51	77
Surface de voile équivalente	<i>m</i> ²	20.45	4000
Déplacement (estimation)	<i>t</i>	330	900
Surface mouillée (estimation)	<i>m</i> ²	6.2	1200
Diamètre turbine	<i>m</i>	0.24	3.36
CT	-	0.474 (0.057)	0.474 (0.057)
CP	-	0.238 (0.086)	0.238 (0.086)
TWS	<i>m/s</i>	2.79 (0.48)	10.4 (1.8)
TWA	°	85.3 (4.7)	85.3 (4.7)
SOG	<i>m/s</i>	2.01 (0.14)	7.5 (0.5)
Nombre de Froude	-	0.27	0.27
Nombre de Reynolds	-	1.1E+07	5.8E+08
Puissance sur l'arbre sans correction (Reynolds)	<i>kW</i>	0.063 (0.032)	650 (330)
Puissance sur l'arbre corrigée (Reynolds)	<i>kW</i>	0.063 (0.032)	895 (450)

Tableau 2. Extrapolation des résultats. Les valeurs entre parenthèses sont les écarts-types.

4 CONCLUSIONS

Cette campagne d'essai a permis de valider expérimentalement le principe du navire éolien, notamment en vérifiant qu'il permet de produire des quantités significatives d'énergie (de l'ordre de 1 MW par vent de force 5-6 sur l'échelle de Beaufort). Ces résultats obtenus sont en accord avec les simulations précédemment réalisées au LHEEA.

Les résultats confirment également l'importance d'optimiser la traînée de l'hydrogénérateur pour maximiser la production d'énergie. Cependant, les essais n'ont pas permis de déterminer le point de fonctionnement optimal. Pour cela, il faudrait refaire des essais sur une plus grande gamme de tension d'alimentation de l'hydrogénérateur (10-50 V), et utiliser une hélice plus petite.

Par ailleurs, cette première plateforme était pilotée par un équipage de deux personnes et possédait un gréement classique (Grand voile + foc), impliquant des incertitudes tant sur le cap (barreur) que l'assiette (position de l'équipage, réglage des voiles). C'est pourquoi la prochaine version de la plateforme, en cours d'assemblage, sera téléopérée, et sera équipée de rotors Flettner (Figure 12). Ces modifications devraient permettre à la fois de se rapprocher du démonstrateur, et de permettre une meilleure reproductibilité des essais. Une campagne d'essais de plus grande ampleur sera réalisée afin de cartographier les performances de la plateforme.

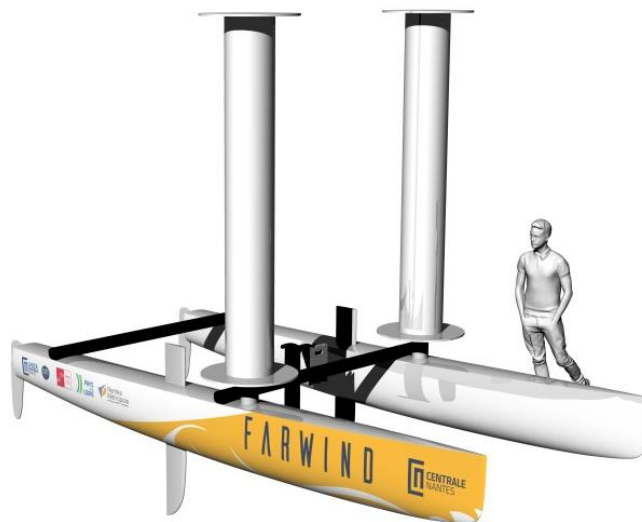


Figure 12. Version 2 de la plateforme d'essais

5 REMERCIEMENTS

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du West Atlantic Marine Energy Community – WEAMEC. Ils ont reçu le soutien financier de la Région Pays de la Loire et de Nantes Métropole.

6 ANNEXE 1 : QUALIFICATION DE LA TURBINE EN BASSIN

6.1 Présentation

Une campagne d'essais en bassin a été réalisée dans le bassin de traction de Centrale Nantes en février 2020. L'hydrogénérateur Watt&Sea Cruising 600 était monté sur sa balance d'efforts, elle-même fixée au chariot de traction, utilisé pour simuler la vitesse d'avance. L'ensemble des essais a été réalisé sur une plage de vitesses allant de 1.5 à 6.0 m/s. Quatre hélices de diamètre allant de 200 mm à 410 mm ont été testées. La tension d'alimentation de l'hydrogénérateur pouvait être pilotée pour faire varier à la fois la traînée et la production d'énergie.

6.2 Montage expérimental

Le montage expérimental est présenté en Figure 13. On y aperçoit l'hydrogénérateur sur sa balance ainsi que les quatre hélices testées (trois hélices standard de chez Watt&Sea, et une hélice custom). L'arbre d'hélice est immergé à 520 mm de profondeur. Deux mètres en arrière de l'hydrogénérateur, une caméra filme l'hélice (Voir Figure 16).

La traînée de l'ensemble « matereau/pod/hélice » est mesurée par la balance d'efforts. Un passage sans hélice à différentes vitesses a permis d'obtenir la courbe de traînées de l'ensemble « Matereau/nacelle » seuls. Cette courbe de résistance est ensuite soustraite aux mesures afin d'obtenir la traînée de l'hélice seule.

L'ensemble des données issues de l'hydrogénérateur est également collectée (Tension, courant, vitesse de rotation). La tension de sortie de l'hydrogénérateur est pilotable entre 10 V et 50 V, ce qui permet de jouer sur le couple résistif de la génératrice et donc à la fois sur la traînée et la production d'énergie : à vitesse égale, une tension de 50 V aura pour effet de diminuer le couple (La vitesse de rotation augmente et la production diminue) tandis qu'une tension de 10 V augmentera le couple (La vitesse de rotation diminue et la production augmente).

Les paramètres variables de cette campagne sont donc la vitesse d'avance, le type d'hélice et la tension de sortie de l'hydrogénérateur.

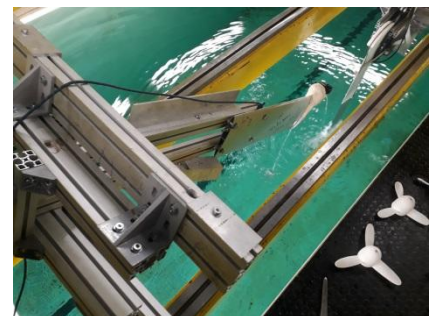
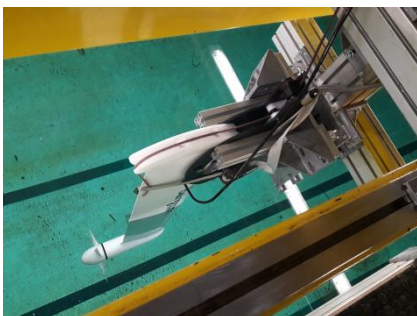
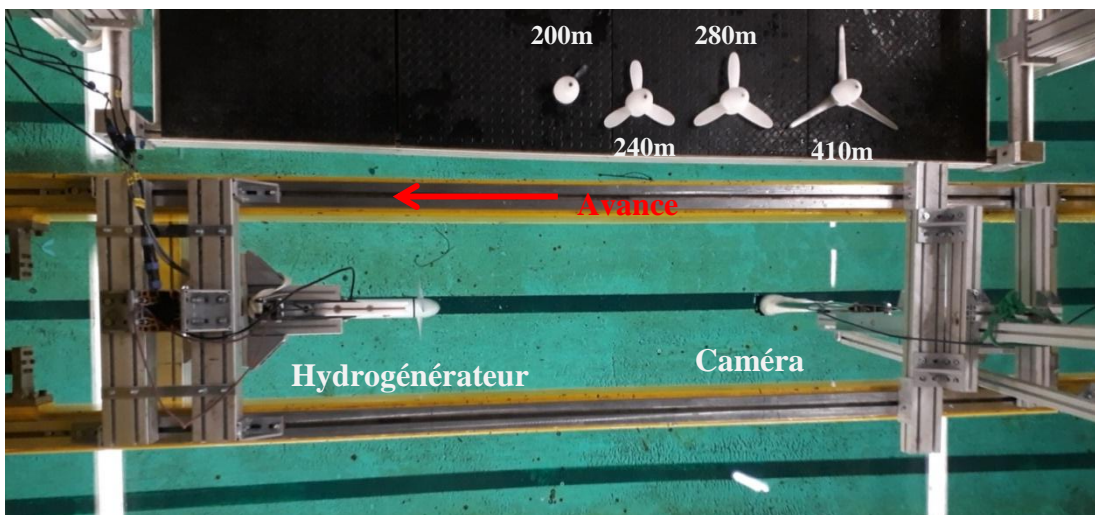


Figure 13. Montage expérimental pour les essais en bassin

6.3 Méthodologie

Le chariot parcourt la longueur du bassin de traction (140m) à différentes vitesses. Pour les faibles vitesses, deux paliers sont réalisés sur chaque passage. A la fin de l'essai, le chariot est ramené à vitesse lente à sa position de départ.

Une rampe d'accélération et de décélération permet une mise en vitesse progressive du chariot.

Il faut noter ici que tous les essais ont été réalisés à vitesses constantes, sans prendre en compte un ralentissement dû à la traînée de l'hydrogénérateur comme c'est le cas sur la plateforme d'essais. Ce

protocole nous permet de caractériser le système en terme de trainée et de production pour différentes vitesses stabilisées.

6.4 Résultats

Pour des raisons de confidentialité, les résultats sont exprimés en terme de C_T et C_P relatifs (Figure 14).

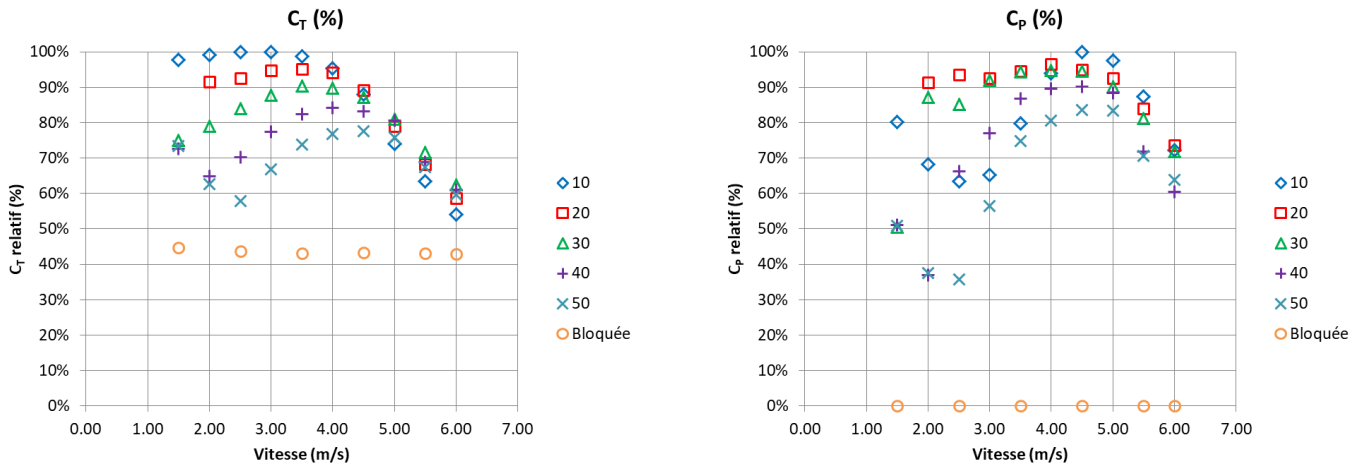


Figure 14. Influence de la tension d'alimentation de l'hydrogénérateur sur la trainée et sur la production d'énergie. C_T et C_P en fonction de la vitesse d'avance (m/s)

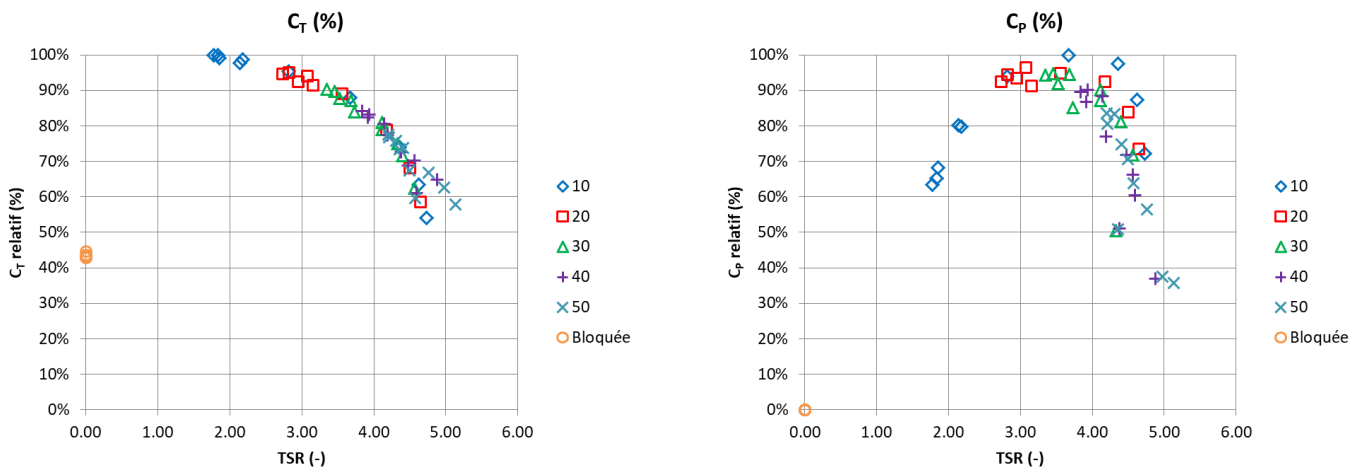


Figure 15. Influence de la tension d'alimentation de l'hydrogénérateur sur la trainée et sur la production d'énergie. C_T et C_P en fonction du tip speed ratio (-)



Figure 16. Hélice 240mm à l'arrêt (gauche) et pendant un essai (droite)

La Figure 14 présente les résultats adimensionnels pour l'hélice 240 mm (utilisée lors des essais sur l'Erdre). Les valeurs sont normalisées par rapport à la valeur maximale. Pour la vitesse cible des essais sur l'Erdre (2.1 m/s), on voit que faire varier la tension d'alimentation de l'hydrogénérateur permet de faire varier le C_T entre 60% et 100% de sa valeur maximale.

7 RÉFÉRENCES

- [1] A. Babarit, J-C. Gilloteaux, E. Body, J-F. Hétet (2019) Energy and economic performance of the FARWIND energy system for sustainable fuel production from the far-offshore wind energy resource. In Proc. Of the 14th International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), Monaco
- [2] R.E. Salomon (1982) Process of converting wind energy to elemental hydrogen and apparatus therefore. U.S. Patent 4335093A
- [3] J. Kim, C. Park (2010) Wind power generation with a parawing on ships, a proposal. Energy, Vol. 35, pp. 1425-1432
- [4] A. Babarit, J.C. Gilloteaux, G. Clodic, M. Duchet, A. Simoneau, M.F. Platzer (2018) Techno-economic feasibility of far offshore hydrogen-producing wind energy converters. International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 43(15), pp. 7266-7289
- [5] P.F. Pelz, M. Holl, M. Platzer (2016) Analytical method towards an optimal energetic and commercial wind-energy converter. Energy, Vol. 94, pp. 344-351
- [6] M.F. Platzer, N. Sarigul-Klijn, J. Young, M.A. Ashraf, J.C.S. Lai (2014) Renewable hydrogen production using sailing ships. ASME Journal of Energy Resources Technology, Vol. 136
- [7] M. Tsujimoto, T. Uehiro, H. Esaki, T. Kinoshita, K. Takagi, S. Tanaka, H. Yamaguchi, H. Okamura, M. Satou, Y. Minami (2009) Optimum routing of a sailing wind farm. Journal of Marine and Science Technology, Vol. 14, pp. 89-103
- [8] K. Ouchi, J. Henzie (2017) Hydrogen generation sailing ship: conceptual design and feasibility study. In Proc. of IEEE OCEANS 2017
- [9] J.C. Gilloteaux, A. Babarit (2017) Preliminary design of a wind driven vessel dedicated to hydrogen production. In Proc. of the ASME 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE2017), Trondheim, Norway.
- [10] A. Babarit, G. Clodic, S. Delvoeye, J-C. Gilloteaux (2020) Exploitation of the far-offshore wind energy resource by fleets of energy ships. Part A. Energy ship design and performance. Wind Energy Science, Vol. 5, pp. 839-853
- [11] R. Abd-Jamil, A. Chaigneau, J-C. Gilloteaux, P. Lelong, A. Babarit (2019) Comparison of the capacity factor of stationary wind turbines and weather-routed energy ships in the far-offshore. Journal of Physics: conference series, Vol. 1356
- [12] ITTC: General guidelines for uncertainty analysis in resistance tests. ITTC – Recommended procedures 7.5-02-02-02, 2014
- [13] A. Babarit, G. Clodic, S. Delvoeye, J-C. Gilloteaux Exploitation of the far-offshore wind energy resource by fleets of energy ships. Part B. Cost of energy.
- [14] <https://www.wattandsea.com/fr/produits/hydro-cruising/hydro-cruising-600>