



**ÉTUDE D'UNE HYDROLIENNE A MEMBRANE
ONDULANTE A CONVERTISSEURS LINÉAIRES**

***STUDY OF ONDULATING MEMBRANE WITH LINEAR
CONVERTERS***

A. DÉPORTE^{1,2,3}, G. GERMAIN¹, M. TRÄSCH³, P. DAVIES¹, J-B. DREVET³

¹ Laboratoire Comportement des Structures en Mer, IFREMER, Centre de Boulogne, BP 699, 62200 Boulogne sur mer

² Ademe, 20 avenue du Grésillé - BP 90406, 49004 Angers

³ EEL Energy, 42 rue Monge, 75005 Paris

astrid.deporte@ifremer.fr

Résumé

Les systèmes de récupération d'énergie des courants marins sont majoritairement des machines tournantes. Ces systèmes classiques ont de nombreux désavantages dans le milieu marin très inhospitalier. Nous proposons ici l'étude d'un système basé sur une membrane semi-rigide ondulant sous la pression du courant. Les déformations de la structure sont ensuite amorties pour récupérer une puissance électrique. On présente ici les développements numériques et expérimentaux réalisés pour étudier le comportement du système.

Summary

Tidal energy converters are mostly marine turbines. They have many disadvantages in sea where the environment is very inhospitable. We study a new system based on undulating membrane. Pressure deforms the device periodically, we observe a wave propagating along the length. Electromagnetic converters are distributed over the length of the membrane and act like dampers. In this paper, we present numerical and experimental developments carried out to study the system's behavior.

I – Introduction

Les énergies marines renouvelables sont en pleine essor. La France, de part sa position géographique et ses nombreux territoires d’outre-mer, possède une surface maritime exploitable importante. Afin d’atteindre son objectif de 20 % de consommation d’énergie renouvelable à l’horizon 2020, le développement des énergies marines renouvelables est incontournable. Les courants marins en particuliers ont de nombreux avantages : ils sont prévisibles, localisés et importants.

Les systèmes classiques à hélice sont soumis en milieu marin à de fortes contraintes notamment liées aux variations de chargements dans la colonne d’eau qui peuvent entraîner un endommagement des machines ou une diminution des performances [1], [6]. Nous proposons ici l’étude d’une hydrolienne innovante basée sur une membrane ondulante. Le concept a déjà été présenté lors des précédentes Journées de l’hydrodynamique [3] et à la conférence EWTEC 2013 [4]. Depuis, un nouveau prototype, destiné aux essais en mer, a été fabriqué pour tester le système de conversion d’énergie développé spécialement. Nous présentons ici la caractérisation du prototype sans convertisseur ainsi que l’extrapolation des résultats à partir du modèle numérique développé en parallèle.

II – Étude expérimentale du système à l’échelle 1/6 ième

Les essais décrits dans cette partie ont été réalisés en juillet 2014 sans convertisseur au Bassin d’essai de Boulogne sur mer. Il s’agissait de vérifier l’installation et le bon fonctionnement du système soumis au courant et d’acquérir une base de données pour valider le modèle numérique.

II – 1 Description du prototype

Le prototype utilisé est constitué d’un squelette rigide en carbon-epoxy composé de profilés longitudinaux, orientés dans le sens des déformations donnant ainsi la rigidité à la membrane et de profilés transverses permettant de conserver un mouvement 2D évitant ainsi les mouvements de torsion qui pourraient détériorer la structure.

Le squelette est recouvert de part et d’autre d’une membrane en caoutchouc avec une formulation anti-fouling non toxique. Elle permet de capter les efforts du fluide sur une grande surface et de les transmettre au squelette. On a ainsi une surface efficace importante. Une vue éclatée de la membrane ainsi qu’une photo du prototype lors de son assemblage sont visibles sur la figure 1.

Cette structure semi-rigide est mise en compression par des câbles. La pression du fluide sur la membrane l’oblige à se déformer suivant un mouvement d’oscillation. Ce sont ces déformations périodiques que l’on veut transformer en puissance électrique.

La membrane est reliée au support par des bras rigides. Entre les bras et la membrane, une charnière permet aux oscillations de démarrer dès le point d’accroche. La structure au repos est portée par un berceau, maintenant la membrane au milieu de la colonne d’eau, lui-même posé sur un pivot qui permet d’orienter la structure dans le sens du courant. Un châssis la maintient sur le fond.

II – 2 Description des essais et de l’instrumentation

Les essais ont lieu au bassin à houle et à courant de Boulogne sur mer. Il s’agit d’un bassin de circulation dont la zone utile mesure 12m de long, 4m de large et 2m de hauteur

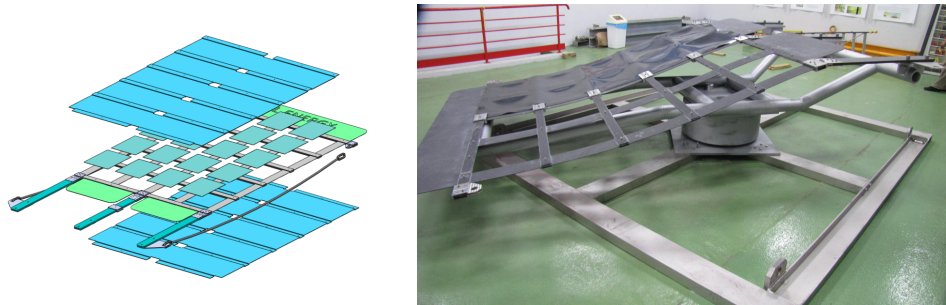


Figure 1 – Schéma et photo de l'hydrolienne en cours d'assemblage

d'eau. La vitesse du courant varie entre 0.15m/s et 2.2m/s. Le taux de turbulence choisit pour ces essais est de 3 % environ. Les différents éléments du système : châssis, berceau et membrane sont installés sous l'eau par un plongeur.

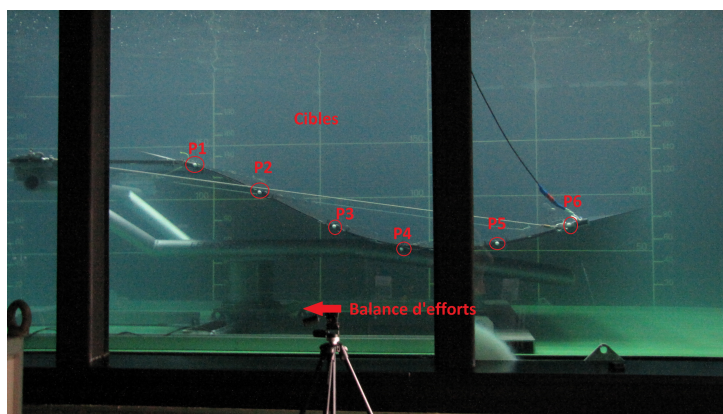


Figure 2 – Photo du système et de son instrumentation dans le bassin d'essai

Du fait de la taille de la membrane et de son encombrement, on s'intéresse exclusivement au comportement de la structure. Le sillage peut difficilement être étudié avec ce prototype. L'instrumentation se compose (figure 2) :

- de deux caméras ($f_{acquisition} 16Hz$) associées à 6 cibles pour faire de la trajectométrie. Les cibles sont positionnées aux futurs points d'accroche des convertisseurs. Les images sont traitées avec le logiciel libre Blender pour déterminer les mouvements de la structure.
- d'une balance 6 composantes située sous le pivot. Elle permet de mesurer l'ensemble des efforts hydrodynamiques s'exerçant sur la structure.
- de jauges de déformation collées sur les profilés longitudinaux du squelette¹. Les jauges sont installées pour étudier d'éventuels effets de fatigue et pour préparer des essais en mer où la visibilité ne permettrait pas d'effectuer de la trajectométrie.

Les deux variables de ces essais sont la longueur des câbles de compression et la vitesse d'entrée du courant.

1. Sur les 6 jauges installées, une seule a fonctionné durant les essais. On a perdu le signal des autres au bout de quelques oscillations. Les fils de connexion des jauges ont été rigidifiés lors du collage et se sont rompus avec les déformations.

II – 3 Résultats expérimentaux

En l'absence de convertisseurs, on caractérise le mouvement en terme d'amplitude le long de la membrane et de fréquence d'oscillation. L'amplitude est adimensionnée par la longueur de référence qui est la longueur de la membrane.

Les câbles utilisés ont une longueur de $0.98L$ (C1), $0.96L$ (C2) et $0.94L$ (C3) soit une longueur de retrait de $0.02L$ (C1), de $0.04L$ (C2) et de $0.06L$ (C3). La vitesse de démarrage des oscillations dépend fortement de la longueur du câble de compression. Plus la membrane est comprimée et plus il lui faut d'énergie pour commencer à onduler. Pour C1, les mouvements sont initiés à 0.8m/s , pour C2 à 0.9m/s et pour C3 à 1.1m/s . Sans câble, il n'y a pas d'oscillation dans cette gamme de vitesse, la membrane se positionne quasiment à l'horizontale. La figure 3 présente les variations de la fréquence d'oscillation de la mem-

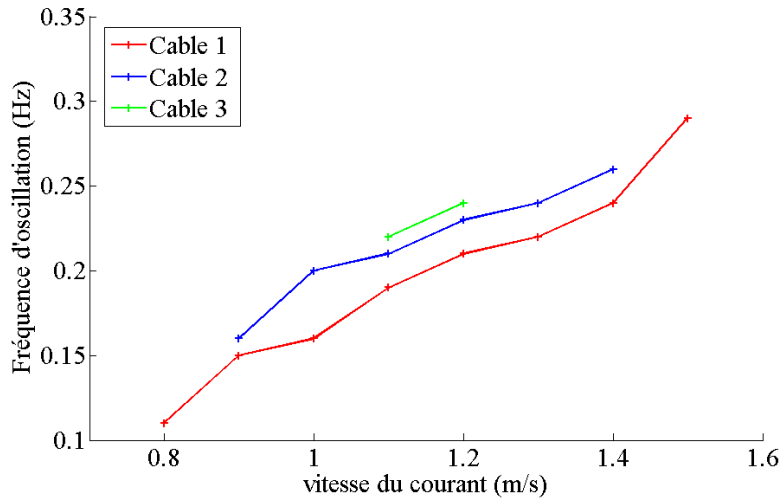


Figure 3 – Influence des paramètres d'expérimentation (câble et vitesse) sur la fréquence d'oscillation

brane, cette fréquence est la même pour tous les points-cibles. (figure 2). Plus le câble est court et plus la membrane oscille rapidement. La fréquence croît quasi linéairement avec la vitesse du courant entre 0.8 et 1.4m/s . A faible vitesse, le mouvement est lent et on observe moins d'une longueur d'onde se propageant sur la longueur. Lorsqu'on augmente le retrait du câble ou la vitesse, le mouvement s'accélère : la surface opposée au fluide est plus importante et on a une meilleure transmission de l'énergie. La déformation se rapproche de la longueur d'onde.

L'amplitude considérée sur la figure 4 est l'amplitude tête à creux, elle est adimensionnée par la longueur de la membrane et divisée par deux pour tracer l'enveloppe supérieure. L'amplitude croît lorsqu'on s'éloigne de l'accroche. Elle diminue quand la vitesse du fluide augmente et elle augmente lorsqu'on comprime la membrane. Les résultats pour chacun des câbles sont distincts, deux groupes se séparent à partir du point 4 : en configuration C1, avec des vitesses inférieures à 1.4m/s et en configuration C2 et C3, on observe en bout de membrane une amplitude plus importante. Les câbles ont une forte influence sur la propagation des ondes et sur la forme de la membrane alors que la vitesse en a peu.

Sur la figure 5, nous avons représenté l'évolution des déformations mesurées par la jauge de contrainte située en bout de membrane au milieu de la largeur au niveau de P6. Ces résultats montrent que plus le câble est comprimé et plus la vitesse est importante et plus l'amplitude du signal est grande. Les jauges permettent de dégager des informa-

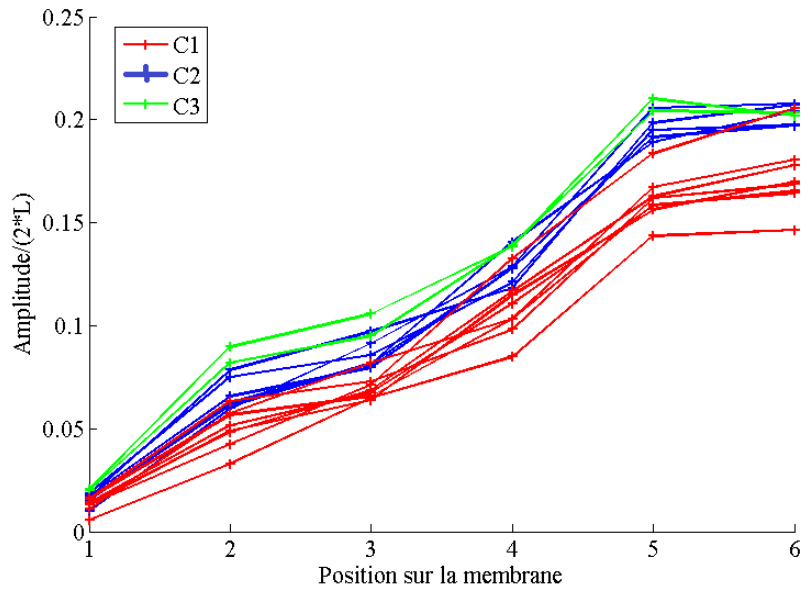


Figure 4 – Amplitude le long de la membrane pour différentes vitesses en fonction du câble utilisé

tions en fonction de la vitesse du fluide mais aussi du câble utilisé. La régression est quasi linéaire. Ces résultats seront à comparer avec les essais avec convertisseurs. Ils permettent aussi, sur le long terme, d'étudier l'évolution de la tenue mécanique des profilés en composite qui constituent le squelette.

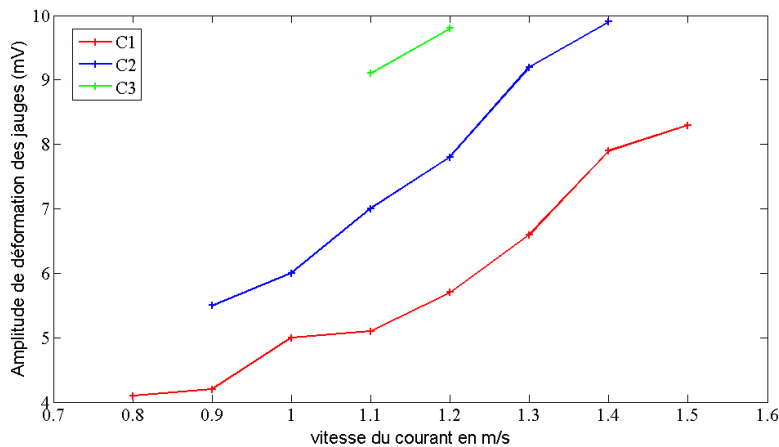


Figure 5 – Amplitude du signal de la jauge en fonction des paramètres des essais

Pour les prochains essais, trois jauges seront localisées sur la ligne centrale, nous pourrions aussi suivre les différences en fonction de leur localisation mais aussi corréler les déformations des jauges avec les mouvements de la structure. L'objectif est, en mer, d'utiliser ces jauges comme nous utilisons en bassin la trajectométrie, pour étudier la propagation de l'onde le long de la membrane.

Ces essais nous ont permis de vérifier le bon comportement de la structure. Nous avons ainsi un état de référence pour plusieurs configurations et pour une large gamme de vitesse de courant à comparer aux prochains essais avec convertisseurs. Les tendances mises en lumière nous aideront à valider le modèle numérique et à mieux comprendre le fonctionnement du système afin d'anticiper au mieux l'action des convertisseurs.

III – Comparaison des résultats avec les simulations numériques

III – 1 Présentation du modèle et hypothèses

Pour modéliser le comportement de l'hydrolienne nous développons un modèle numérique 2D à l'aide du logiciel commercial Adina. Le couplage fort entre le fluide et la structure est pris en compte à travers un couplage direct des équations fluide et solide. Le modèle structure est un modèle simplifié de la membrane, nous approximations les paramètres matériaux notamment le module d'Young par une loi de mélange entre le caoutchouc et le squelette en carbone-epoxy. Les bras sont considérés comme non déformables. Seul les déflecteurs et la membrane sont en contact avec le fluide. La géométrie a aussi été simplifiée, il n'y a pas de variation de l'épaisseur le long de la membrane. Le fluide utilisé est un fluide peu compressible² et non turbulent. Les interactions ont lieu uniquement avec les déflecteurs et la membrane avec des conditions de non glissement. Les modèles fluide et solide sont décrits sur la figure 6. Le domaine fluide mesure $6L \times 2L$, il se compose de 63390 éléments. Les mailles à l'interface mesurent $5.2 \cdot 10^{-3}L \times 1.3 \cdot 10^{-3}L$. La partie solide possède 7761 éléments. Les éléments de la partie membrane mesurent $1.66 \cdot 10^{-3}L \times 1.6 \cdot 10^{-4}L$.

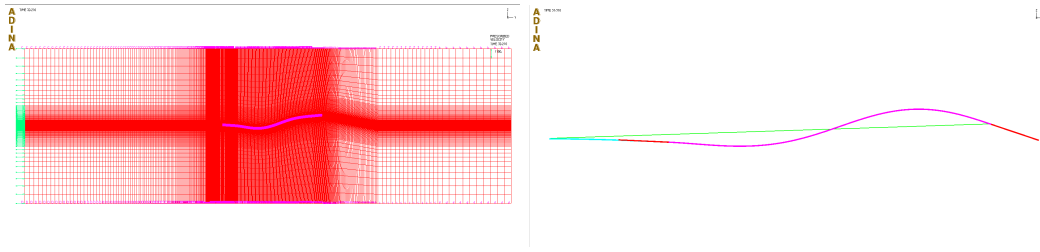


Figure 6 – Modèle numérique 2D

III – 2 Comparaison des résultats numériques et expérimentaux

Une comparaison des fréquences obtenues expérimentalement et numériquement est présentée figure 7. Les erreurs relatives entre les deux approches sont reportées dans le tableau 8. La valeur de référence est la valeur expérimentale.

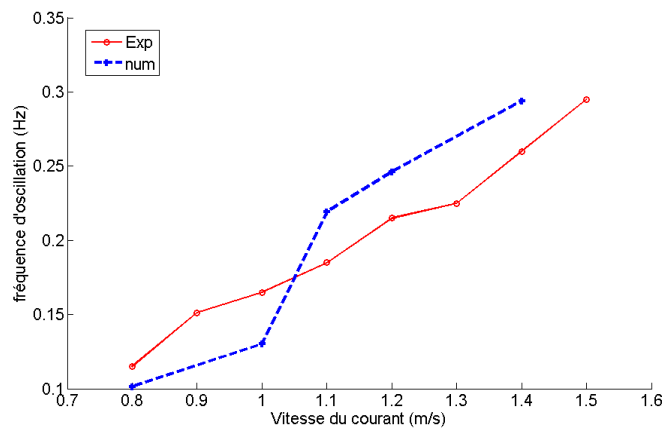


Figure 7 – Comparaison des fréquences d'oscillation expérimentale et numérique

Une tendance similaire est obtenue dans les deux cas, plus on augmente la vitesse et plus la fréquence est importante. Pour les vitesses inférieures à 1m/s, on sous estime

2. La densité dépend du paramètre module d'élasticité isostatique (bulk modulus)

la fréquence alors qu'on la sur-estime pour les valeurs supérieures. L'erreur relative est inférieure à 15 % sauf pour $v=1\text{m/s}$, juste avant qu'on surestime les fréquences. L'erreur relative la plus basse est obtenue pour $v=0.8\text{m/s}$.

	câble C1				
vitesse du courant (m/s)	0.8	1	1.1	1.2	1.4
err. relative (%)	11.9	21.2	12.6	14.6	13

Figure 8 – Erreur relative sur la fréquence pour les différentes vitesses (%)

La figure 9 permet de comparer les enveloppes supérieures de la membrane obtenues numériquement et expérimentalement. On remarque que pour de faibles vitesses (inférieures à 1m/s), l'amplitude a le bon ordre de grandeur alors que pour des vitesses plus importante, elle est largement sous-estimée. Les valeurs des erreurs relatives sont données dans le tableau 10. Le point numéro 2 est le plus mal représenté, son amplitude est faible ce qui entraine des erreurs relatives d'autant plus importantes. Si on se place à 0.8m/s , où on est le plus proche en fréquence, la différence d'amplitude est plus importante en début de membrane qu'en bout. De nombreuses approximations sont faites sur la modélisation de l'attache de la membrane et donc sur le degré de liberté dont elle dispose à cette endroit, elles peuvent expliquer qu'on obtienne des différences significatives.

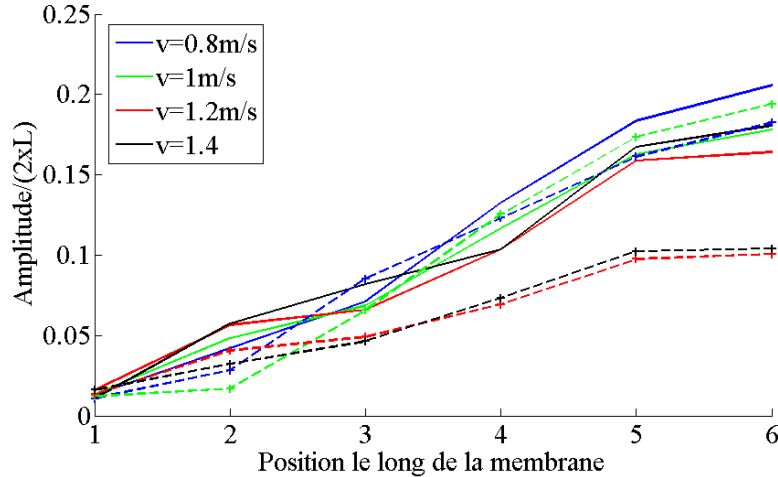


Figure 9 – Comparaison des enveloppes numériques et expérimentales pour 4 vitesses de courants

		Erreur relative amplitude					
		P1	P2	P3	P4	P5	P6
C1	0.8 m/s	16.9	33.5	19.9	7.1	12.1	11.3
	1 m/s	26.5	53.7	22.7	15.8	7.7	9.6
	1.2 m/s	16.3	28.3	25.5	33	38.5	38.7
	1.4 m/s	48.1	43.6	43.4	29.2	38.8	42.3

Figure 10 – Erreur relative en amplitude (%)

L'évolution des amplitudes de mouvement est présentée sur la figure 11 en chaque point de contrôle. Les amplitudes sont comparables mais la taille des paliers est différente. On le voit pour P3, la valeur expérimentale de l'amplitude est maximum pendant une

large période de temps alors que la valeur numérique passe plus rapidement par le maximum mais s'annule pendant quelques secondes lorsqu'elle passe par l'origine. De même, l'évolution des points P1 et P2 obtenue numériquement fait état de deux pics par périodes. Le mouvement simulé numériquement est plus saccadé sur l'avant avec un mouvement harmonique de fréquence double.

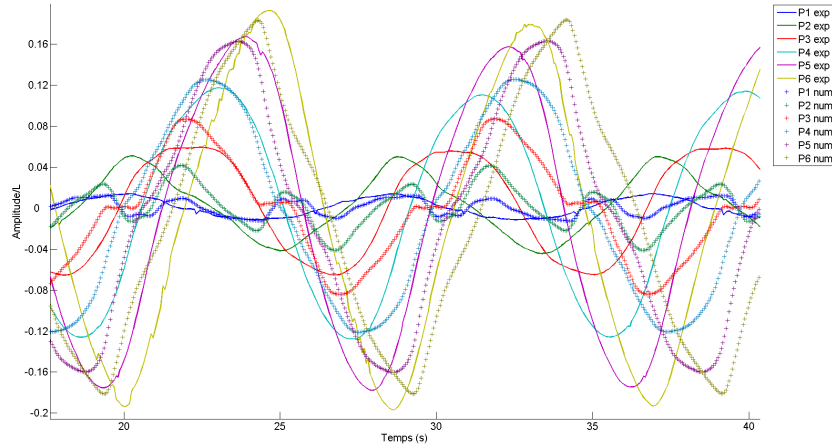
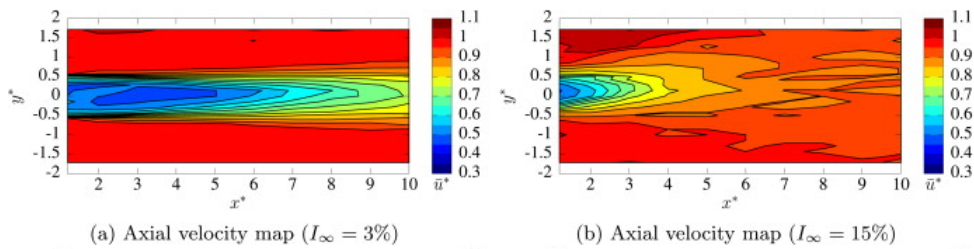
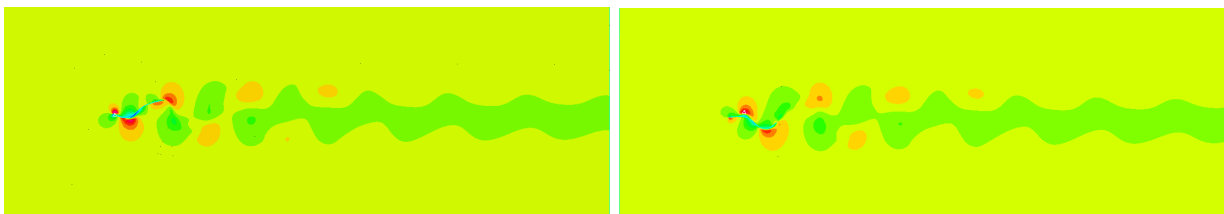


Figure 11 – Allure des amplitudes des points-cibles expérimentales et numériques

Le modèle numérique nous permet d'avoir accès à l'ensemble du domaine fluide. Nous nous intéresserons dans un premier temps à la vitesse moyenne. La figure 12 compare le sillage d'une hydrolienne classique, tripale [6] et le sillage derrière une membrane ondulante. L'écoulement n'est pas homogène dans le temps, on ne peut pas l'approximer par un cône dans lequel la vitesse est moins importante au centre. Ici, le sillage se rapproche plus de celui d'un cylindre en mouvement. On observe un lâché tourbillonnaire alterné toutes les demi-périodes.



(a) Hydrolienne tri-pale [6] $v=0.8\text{m/s}$ (expérimentale)



(b) Hydrolienne à membrane ondulante $v=1.5\text{m/s}$ à t et $t+T/2$ $I_\infty = 0\%$ (numérique)

Figure 12 – Comparaison du sillage de deux types d'hydrolienne : à hélice et à membrane ondulante

Les efforts de portance et de trainée associés sont illustrés sur la figure 13. La portance est bien symétrique par rapport à l'axe des abscisses par contre la trainée fait état de

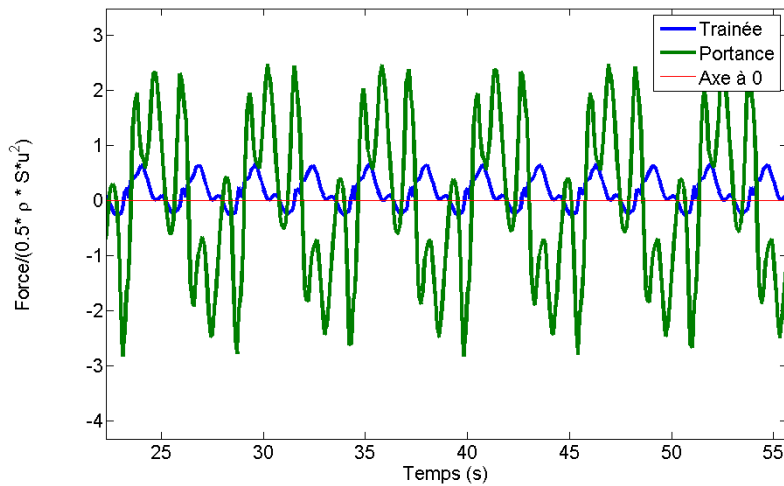


Figure 13 – Force de trainée et de portance - numérique

configurations dans lesquelles elle est négative, c'est à dire qu'elle s'oppose au courant. Cela se produit au moment du lâché tourbillonnaire. La fréquence de la trainée est le double de celle de la portance.

La fabrication d'un prototype à l'échelle 1/20 ième nous permettra d'aller plus loin dans la validation de la partie fluide du modèle numérique. En effet, l'encombrement du prototype actuel ne nous permet pas d'étudier plus précisément le sillage ni l'écoulement au dessus de la membrane.

IV – Modélisation du fonctionnement avec des convertisseurs linéaires

IV – 1 Choix de la gamme de réglage

Les convertisseurs sont développés par la société EEL Energy. Ils s'agit de convertisseurs électro-mécaniques linaires basse fréquence. Un prototype de convertisseur est actuellement testé sur un banc d'essai dédié comme on peut le voir sur la figure 14.

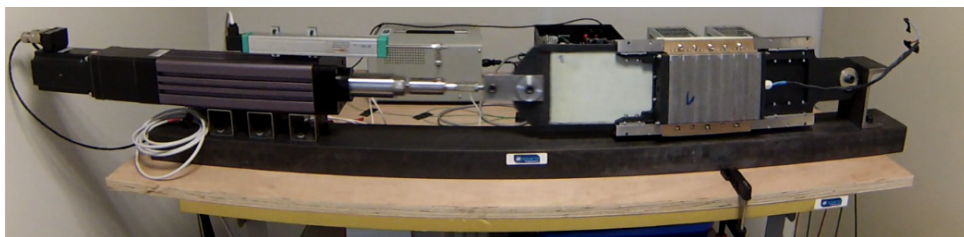


Figure 14 – Banc d'essai pour les convertisseurs

Sur le modèle numérique, on dissipe l'énergie par un amortissement visqueux c'est à dire par une force en $F = C \cdot v$ soit une puissance convertie ou dissipée en $P = C \cdot v^2$. Ce coefficient doit être calibré grâce aux essais sur les convertisseurs. A l'aide des premiers tests, on a estimé une première valeur de coefficient d'amortissement à environ $C = 16kg/s^{-1}$ par convertisseurs. La figure 15 montre les modèle CAO et numérique du système avec les convertisseurs.

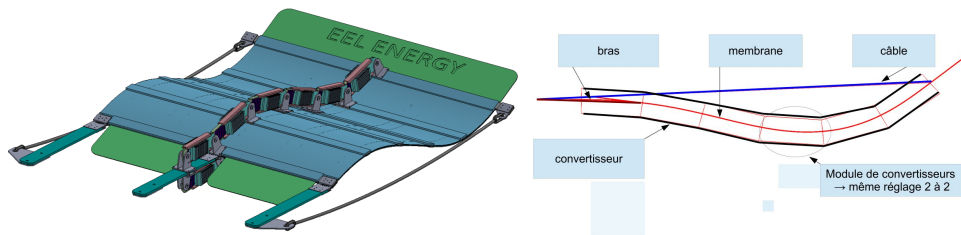


Figure 15 – Modèles CAO et numérique de la membrane avec convertisseurs répartis

IV – 2 Impact de la position d'un module de convertisseur

L'objectif est de comprendre comment la localisation d'un convertisseur impacte le mouvement de la membrane. Pour cela, on déplace un ensemble de convertisseurs, composé d'un élément d'amortissement au dessus et d'un élément d'amortissement en dessous de la membrane, avec un coefficient de 8kg/s . La position des convertisseurs est renseignée sur la figure 16.

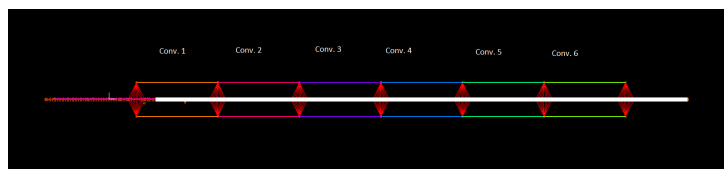


Figure 16 – Position et dénomination des convertisseurs

La figure 17 compare l'enveloppe supérieure en fonction de la position du convertisseur ainsi que la fréquence. Les valeurs de référence sont calculées aux mêmes points dans une configuration sans convertisseurs. La forme de l'enveloppe supérieure reste la même : l'amplitude croit le long de la membrane. Par contre, l'amplitude point par point diminue lorsque l'amortissement est appliqué par le convertisseur 4 alors qu'elle augmente dans les autres cas. La configuration où on utilise uniquement le convertisseur 4 est aussi la seule pour laquelle on augmente la fréquence d'oscillation par rapport à la configuration de référence sans convertisseur.

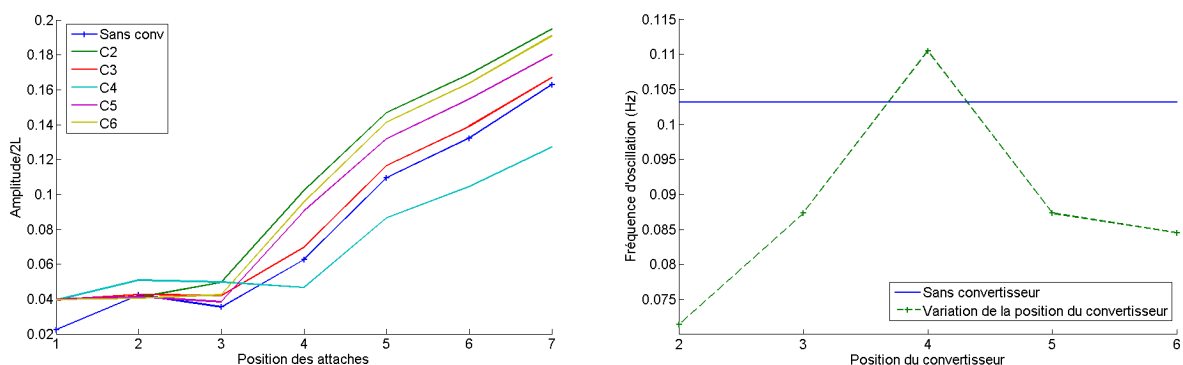


Figure 17 – Influence du positionnement d'un convertisseur sur la fréquence et l'amplitude

Ces résultats montrent la capacité du modèle à simuler la dissipation locale d'énergie suivant une loi proche de celle des convertisseurs. Par la suite, les modélisations seront composées des chaînes de convertisseurs. Le modèle numérique doit nous permettre de mieux anticiper les prochains essais avec convertisseurs répartis et de proposer des combinaisons de coefficients adaptées aux différentes configurations de câbles et de vitesses.

V – Conclusion et Perspectives

Nous disposons d'un prototype instrumenté d'une membrane ondulante prêt à fonctionner avec des convertisseurs répartis. Les essais qui ont eu lieu en juillet nous ont permis d'étudier les tendances du comportement en amplitude et fréquence pour une large gamme de vitesses de 0.8 à 1.5m/s et cela pour trois longueurs de câbles de compression.

Les données acquises nous ont aussi permis de caler le modèle numérique pour une configuration particulière avec laquelle nous allons travailler par la suite. Nous obtenons les mêmes tendances avec le modèle numérique que durant les essais pour les paramètres étudiés.

Le modèle numérique nous permet d'extrapoler le comportement avec convertisseurs répartis. Nous avons commencé par ajouter un seul module de convertisseur, avec un seul réglage et nous avons fait varier sa position. La position 4 offre un comportement différent des autres car on observe une amplitude moins importante et une fréquence plus élevée que sans convertisseur. Il faudra par la suite étudier si ce comportement se retrouve en présence d'une chaîne de convertisseur. C'est à dire si le comportement global est une "somme" des différents comportements ou si le comportement est influencé par la chaîne entière de convertisseurs.

Les prochains essais avec convertisseurs répartis doivent avoir lieu avant la fin de l'année. D'ici là, nous aurons une meilleure approximation des coefficients d'amortissement réellement possibles. Le modèle numérique nous permettra de savoir quelles configurations seront les plus intéressantes à tester.

En parallèle, nous développons un prototype à l'échelle 1/20ième afin de pouvoir étudier les effets d'échelle, de caractériser l'écoulement autour et derrière le système ainsi que les interactions entre membranes comme cela a été fait pour les machines tournantes [5]. La caractérisation de l'écoulement nous permettra de valider la partie fluide du modèle et d'étudier l'influence de la turbulence [5], [2].

Remerciements

Nous remercions l'Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Énergie (ADEME) ainsi que l'entreprise EEL ENERGY pour le financement ce travail de thèse. Nous remercions également J-V. Facq, B. Gaurier et T. Baccheti du bassin d'essai de Boulogne sur mer pour leur aide à la bonne réalisation des essais.

Références

- [1] W. Batten, A. Bahaj, A. Molland, and J. Chaplin. The prediction of the hydrodynamic performance of marine current turbines. In *Renewable Energy*, 2008.
- [2] T. Blackmore, W. Batten, and A. Bahaj. Influence of turbulence on the wake of a marine current turbine simulator. In *The Royal Society*, 2014.
- [3] A. Déporte, G. Germain, J.-B. Drevet, and P. Davies. Étude d'une membrane ondulante pour la récupération de l'énergie des courants marins. In *Journées de l'hydrodynamique*, pages 1–11, 2012.
- [4] A. Déporte, M. Trasch, G. Germain, P. Davies, and J.-b. Drevet. Study of a flexible membrane current energy converter. In *EWTEC*, 2013.
- [5] P. Mycek, B. Gaurier, G. Germain, G. Pinon, and E. Rivoalen. Experimental study of the turbulence intensity effects on marine current turbines behaviour. part 2 : Two interacting turbines. In *Renewable Energy*, 2014.
- [6] P. Mycek, B. Gaurier, G. Germain, G. Pinon, and E. Rivoalen. Experimental study of the turbulence intensity effects on marine current turbines behaviour. part i : One single turbine. In *Renewable Energy*, 2014.