

**ÉTUDE D'UNE MEMBRANE ONDULANTE POUR LA
RÉCUPÉRATION DE L'ÉNERGIE DES COURANTS
MARINS**

***CHARACTERIZATION OF THE BEHAVIOR OF A
FLEXIBLE MEMBRANE FOR CURRENT ENERGY
CONVERTER***

Astrid Déporte^{1,2}, Grégory Germain¹, Jean – Baptiste Drevet³, Peter Davies⁴

1 IFREMER, Hydrodynamic and Metocean Service 150, Quai Gambetta, BP699, F-62321 Boulogne-Sur-Mer, France

2 Agence de l'environnement et de la Maîtrise de l'Energie 20,avenue du Grésillé- BP 90406 49004 Angers Cedex 01 France

3 EEL Energy, 24 rue des Ecoles, 75 000 Paris

4 IFREMER, Materials and Structures Group (ERT/MS), BP70, 29280 Plouzané, France

Résumé

Cet article a pour objet de présenter l'étude d'une membrane ondulante pour la récupération de l'énergie des courants marins. Après une description des moyens et méthodes utilisés, les premiers résultats d'essais obtenus sur un prototype à l'échelle 1/6 sont présentés de manière à caractériser le comportement du système. En parallèle, un modèle numérique est développé. Les premiers résultats obtenus, permettant de statuer sur le bon comportement du modèle en terme de tendances et d'ordre de grandeurs, sont également présentés.

Summary

This project deals with the study of the mechanical behavior of a wavering membrane used to collect marine current energy. We give first a description of means and method used to characterize our system. Then the results of the experiments on a one to sixth prototype are presented. In parallel, a numerical study is performed. This modelling and experiments permit to confirm the efficiency of the wavering membrane.

I – Introduction

La volonté affichée des états à se lancer dans les énergies renouvelables pousse les industriels du secteur à développer de nouvelles technologies pour utiliser ces énergies propres. Les courants marins représentent un potentiel d'énergie non négligeable, non seulement à l'échelle française mais aussi mondiale d'autant plus qu'ils sont prévisibles.

Aujourd'hui, les études les plus avancées, bénéficiant de ce qui a été fait dans l'éolien, portent sur des hydroliennes à hélices [7], [6], mais mêmes ces dernières technologies présentent de nombreux problèmes techniques et des coûts d'installation et de maintenance non négligeables. Pour palier à ces déficiences, ces dernières années, on a vu se multiplier les idées nouvelles et originales pour capter l'énergie des courants marins [2].

C'est dans ce contexte que l'entreprise EEL Energy propose un système innovant, en rupture avec les systèmes à hélices, pour récupérer cette énergie. Le dispositif étudié se compose d'une membrane souple en élastomère rigidifiée avec des profilés en composite et dont la longueur en fonctionnement est contrainte par des câbles disposés entre le châssis et l'extrémité avale de la membrane. Les variations de pression du fluide sur la membrane vont induire et entretenir l'ondulation de la structure (Figure 1).

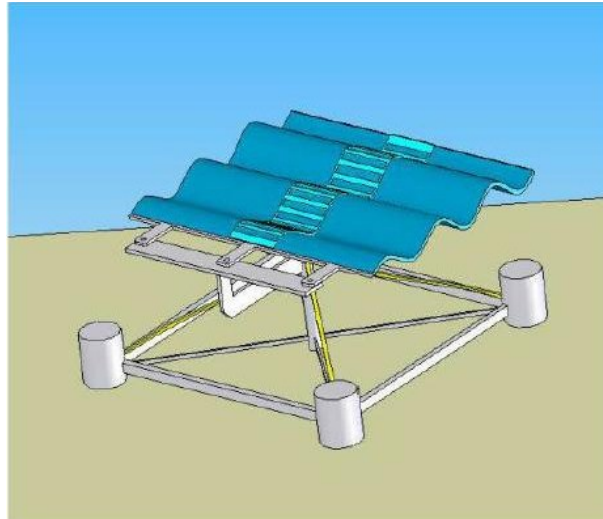


Figure 1 – Schéma du système Eel Energy, monté sur un châssis gravitaire.

Au premier abord, le mouvement de la membrane ressemble à celui d'un drapeau et au phénomène de battement aussi appelé "flapping". Les études [9] et [8] entre autres, se penchent sur le comportement de filaments, image du drapeau en deux dimensions dans un écoulement. Elles soulignent l'importance des paramètres de masse, de rigidité et de la géométrie (longueur et largeur) sur le comportement et le régime de vibration du filament [4].

Une fois le système défini via ces différents paramètres, lorsqu'on augmente la vitesse du courant, on peut observer différents régimes d'oscillations allant d'un système stable où le filament reste parallèle aux lignes de courant, à un système oscillant puis à un système instable aux vibrations chaotiques.

Or si ces dispositifs oscillent librement, ce n'est pas le cas de notre membrane qui est rigidifiée, précontrainte et sur laquelle on disposera par la suite des convertisseurs pour transformer l'énergie mécanique de déformation en énergie électrique. Pour les essais présentés ici, la conversion d'énergie est assurée par un vérin hydraulique relié au bord

aval de la membrane. Le fait de contraindre la membrane est une façon de contrôler les déformations (fréquence, amplitude d'ondulation) et de pouvoir jouer sur les forces de trainée et de poussée comme le montre l'étude [5]. Cet article nous invite aussi à prendre en compte l'angle d'attaque entre la direction du fluide et l'inclinaison de la membrane comme paramètre déterminant.

Dans un premier temps, nous allons décrire le dispositif expérimental mis en place pour caractériser le système et présenter les résultats expérimentaux obtenus sur un prototype à l'échelle 1/6^{ième}. Dans un second temps, nous décrirons le modèle numérique développé en parallèle et présenterons les résultats des simulations numériques servant à optimiser les différents paramètres du système.

II – Dispositif expérimental

II – 1 Moyens d'essai

Les essais sont réalisés au Bassin d'essais de l'Ifremer de Boulogne sur Mer (Figure 2) sur un prototype à l'échelle ($\frac{1}{6}$)^{ième}. Il s'agit d'un bassin de circulation qui mesure 18 mètres de longueur, 4 mètres de large et 2 mètres de profondeur dans la partie utile. Il possède une fenêtre de 8 mètres de long pour l'observation. Il est possible de faire varier la vitesse du courant entre 0.15 et 2 m/s et de faire varier le taux de turbulence de l'écoulement entre 5 et 25 % [3].

Un générateur de houle permet de générer des houles régulière ou irrégulière (en présence ou non de courant), d'amplitude maximum (crête à creux) de 0.3 mètre et de période comprise entre 0.5 et 2 secondes. Il sera aussi possible dans le futur, d'étudier les effets du taux de turbulence de l'écoulement incident et de la houle sur le fonctionnement du système.

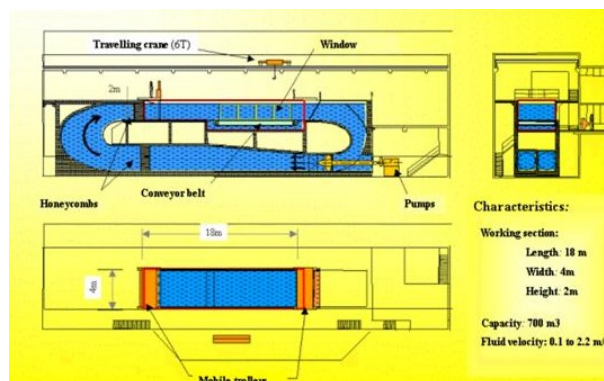


Figure 2 – Schéma du bassin d'essais de Boulogne sur mer

II – 2 La maquette

La membrane utilisée pour ces essais a une longueur L d'environ 2 mètres et possède donc une surface de captage importante LxL (Figure 3). En amont, la membrane est fixée au châssis par une liaison de type rotule par trois bras rigides qui permettent d'amorcer le mouvement. Ensuite vient la membrane en elle même, composée d'élastomère et rigidifiée par des lattes en composite dans les deux directions :

- longitudinalement, les profilés permettent de contrôler la dynamique du système et donc de maîtriser son amplitude et sa fréquence.

- transversalement, ils nous permettent d'assurer un mouvement 2D.

Pour lui donner une forme initiale, la membrane est pré-contrainte à l'aide de câbles fixés de part et d'autre du système. La longueur de ces câbles est inférieure à la longueur de la membrane au repos. Par la suite, on notera L_r , longueur de retrait, la longueur prise aux câbles par rapport à leurs longueurs au repos.

Pour un système innovant comme celui-ci, il faut un convertisseur adapté, il est actuellement en cours de développement. Il s'agit d'un système électromagnétique mis en mouvement par les déformations périodiques de la membrane. Il est prévu de disposer ces convertisseurs tout le long de la membrane ce qui permettra de disposer d'une machine à pas variable optimisant la conversion d'énergie pour toutes les vitesses de courants.

En amont et en aval, deux plaques rigides appelées "déflecteurs" s'inclinent plus que la membrane principale, ils améliorent la portance. Ils permettent de démarrer à des vitesses de courants plus faibles. Nous travaillons lors des essais avec des vitesses de courants qui varient entre 0.6 et 0.9 m/s. Le système démarre vers 0.5 m/s grâce aux déflecteurs. Sans eux, le système se met en mouvement autour de 0.6 m/s. Les longueurs de retrait qui mettent sous tension le système sont entre $0.04L$ et $0.08L$. Les charges sont modifiées par la fermeture de la vanne du hydraulique du vérin.

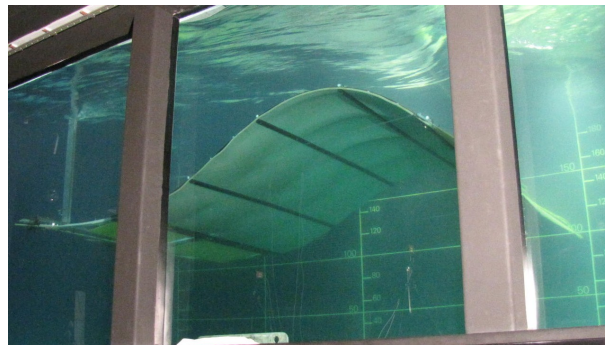


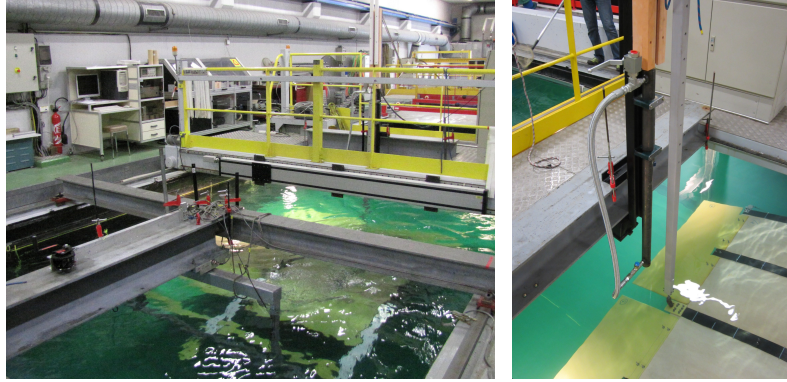
Figure 3 – Membrane en cours de fonctionnement

II – 3 Instrumentation

Le châssis utilisé pour maintenir la membrane est fixé au bassin par l'intermédiaire d'une balance de mesures d'efforts et moments qui nous permet de caractériser l'effort de trainée exercé sur le dispositif.

Afin d'étudier la propagation des ondes, nous avons mis en place un système de trajectométrie synchronisé avec l'enregistrement des efforts. Deux caméras sont installées face à la fenêtre d'observation, elles permettent de suivre le déplacement des cibles fixées sur le bord de la membrane à intervalle régulier avec une précision de l'ordre de quelques millimètres.

Un capteur de traction/compression positionné en aval de la membrane, sur le bras mobile du vérin, nous fournit des informations sur la force exercée par la membrane sur le vérin. Pour calculer la puissance instantanée récupérée par ce « convertisseur » (Figure 4), on multiplie cette force par la vitesse de déplacement en ce point obtenue grâce au système de trajectométrie.



(a) Système de fixation du châssis et de tensionnement de la membrane (b) Simulation du système de conversion d'énergie en bout de membrane

Figure 4 – Illustrations du dispositif expérimental

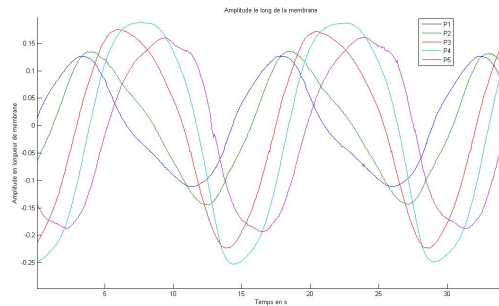


Figure 5 – Evolution temporelle du déplacement vertical des points de référence de la membrane ($L_r=0.04L$, $v=0.7$, charge=6.5)

II – 4 Résultats expérimentaux

Le système de trajectométrie nous permet de suivre le développement de l'onde en amplitude et en fréquence tout le long de la membrane. Sur la figure 5, on présente l'évolution de l'amplitude des cibles dans le temps. Sur cette figure, on note que l'amplitude augmente jusqu'à l'avant dernier point puis qu'elle diminue à cause de la charge que le vérin lui impose. La différence d'amplitude entre le maximum de la première cible et le maximum de l'avant-dernière est de $0.06L$. L'amplitude a globalement une forme sinusoïdale bien que le mouvement ne soit pas parfaitement symétrique.

Les deux premières cibles ont une trajectoire en arcs de cercle centrés sur les points de fixation de la membrane au châssis. Ensuite des "8" indiquent un mouvement couplé et que le système "se plie" à ces endroits là. La variation d'amplitude verticale est de $0.4L$ et la variation horizontale de $0.04L$ pour l'avant dernier point. Le dernier point a une trajectoire plus proche d'un arc de cercle (Figure 6).

Pendant les essais, nous avons fait varier trois paramètres principaux du système que sont : la vitesse du courant, la charge du vérin et la longueur de retrait.

Les objectifs de ces essais sont :

- l'optimisation de la maquette et de son fonctionnement.

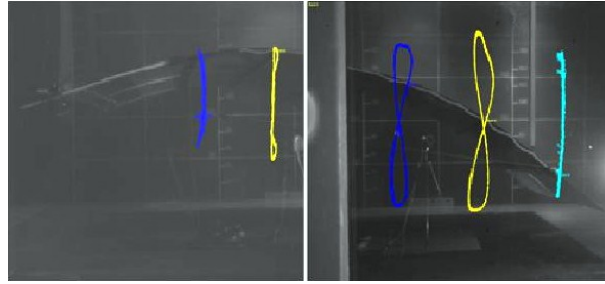
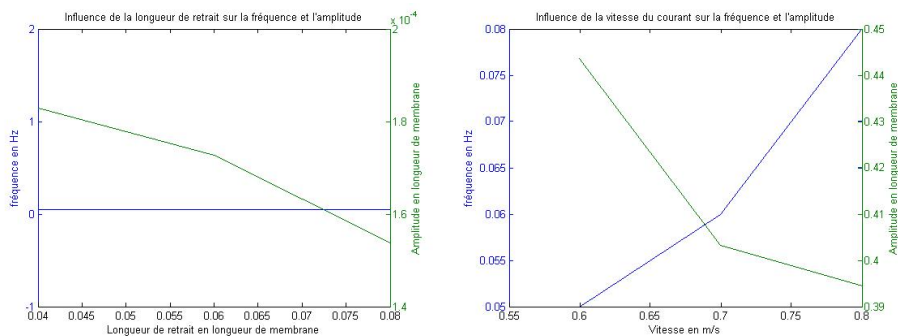
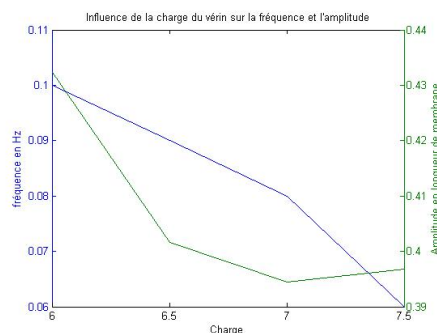


Figure 6 – Trajectoire des cibles le long de la membrane

- La pré-étude du pilotage et le contrôle de cette maquette dans son environnement, par le convertisseur, notamment pour différentes valeurs de vitesse d'écoulement. Les résultats d'essais sont synthétisés sur la Figure 7. L'amplitude considérée ici est celle au niveau du vérin. La longueur de retrait semble ne pas avoir d'impact sur la fréquence par contre, plus elle est importante et plus l'amplitude diminue. Plus la vitesse de courant est importante et plus la fréquence augmente par contre l'amplitude diminue. Enfin, lorsqu'on augmente la charge appliquée au système, c'est à dire la quantité d'énergie prise à la membrane, on diminue à la fois l'amplitude et la fréquence.



(a) Influence de la longueur de retrait ($v=0.6\text{m/s}$, charge=6.5) (b) Influence de la vitesse du courant (charge=7, $L_r=0.06L$)



(c) Influence de la charge du vérin ($L_r=0.06L$, $v=0.8\text{m/s}$)

Figure 7 – Résultats obtenus sur le prototype à l'échelle 1/6

En prenant chaque paramètre à part, on remarque que pour une vitesse de fluide donnée il y a une configuration optimale qui nous permet de récupérer le maximum d'énergie. On s'approche de ce maximum sur la figure 8 où un pic de puissance apparaît

pour une charge allant de 6 à 7.5, une longueur de retrait de $0.06L$ et une vitesse de courant incident de 0.8 m/s. Grâce au système de récupération d'énergie à pas variables, il nous sera possible de nous placer dans la configuration optimale pour chaque vitesse de courant.

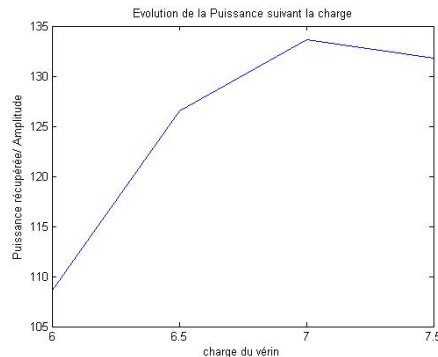


Figure 8 – Rendement en fonction de la charge ($L_r=0.06L$, $v=0.8$)

Ces essais nous ont permis d'obtenir une première caractérisation du mouvement de la membrane pour trois vitesses de courant, quatre longueurs de câbles et quatre charges appliquées au système et ainsi de valider le concept développé par l'entreprise EEL Energy. Il nous est donc maintenant possible de comparer ces résultats d'essais aux modélisations numériques afin de caler nos modélisations et de les rendre exploitables.

III – Modélisation numérique

III – 1 Modèle 2D

Un premier modèle numérique 2D a été développé en parallèle des essais à l'aide du logiciel ADINA. Le logiciel ADINA (Automatic Dynamic incremental Nonlinear Analysis) permet de modéliser par éléments finis des phénomènes fortement non-linéaires et multi-physiques et de simuler des interactions Fluide-Structure en couplage fort [1]. Cette membrane virtuelle permettra, à terme, de jouer sur un plus grand nombre de variables et d'optimiser le système de manière à récupérer un maximum d'énergie.

On s'est attaché, pour ces premières simulations à réaliser un modèle 2D de notre membrane. Le logiciel utilisé nécessite que l'on définisse séparément les parties fluide et solide.

Pour la partie solide, on divise notre système en deux parties (Figure 9).

- La première partie est une barre de liaison rigide en composite de $0.4L$ qui peut tourner autour de son extrémité gauche. Elle correspond à la fixation de la membrane sur le châssis.
- La deuxième partie, de longueur L , est un système composé essentiellement de deux matériaux : les barres en composite du squelette et d'élastomère.

L'épaisseur des deux parties est de $0.0016L$.

A l'extrémité gauche du modèle, on fixe la ligne sur un point représentant l'extrémité de la barre de liaison. Elle ne se déplacera pas mais on lui autorise les rotations. Par rapport aux essais, c'est le point de liaison entre le châssis et la membrane. De l'autre côté, pour simuler la mise sous tension des câbles, on modélise une barre rigide dont

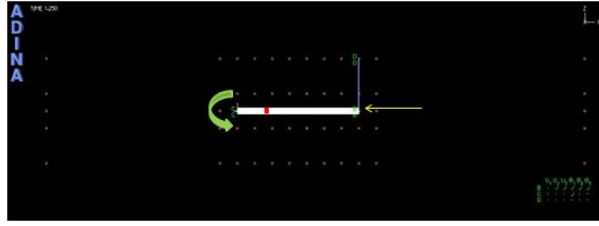


Figure 9 – Schéma du modèle numérique 2D

on force le déplacement pour contraindre la membrane. Le vérin lui est modélisé par un amortissement visqueux. Il est invisible pour le fluide et n'influence que le mouvement de l'extrémité avale de la structure à laquelle il est reliée.

La force qu'il exerce est donc : $F = C \cdot \frac{dz}{dt}$ avec C le coefficient d'amortissement en kg/s.

La puissance récupérable s'écrit alors : $P = F \cdot \frac{dz}{dt} = C \cdot \left(\frac{dz}{dt}\right)^2$ avec P en Watt.

Le domaine fluide est un tunnel de 6.4 fois la longueur de la membrane et d'une hauteur de 1.6L. Le logiciel résout dans ce domaine les équation de Navier-Stokes. L'eau est considérée comme un fluide peu compressible c'est à dire que sa masse volumique dépend de son module d'élasticité isostatique (κ), il relie la pression et le taux de variation du volume.

$\rho = \rho_0 \cdot \left(1 + \frac{p}{\kappa}\right)$ avec ρ_0 la masse volumique quand p=0.

Sur chaque côté, on pose des condition de type "mur". On néglige les effet de bords.

III – 2 Résultats numériques

Dans un premier temps, il s'agit de vérifier si le mouvement global est bien reproduit par notre modèle. Pour cela, nous utiliserons la variation d'amplitude, de fréquence et la trajectoire des cibles le long de cette membrane comme éléments de validations de notre modèle.

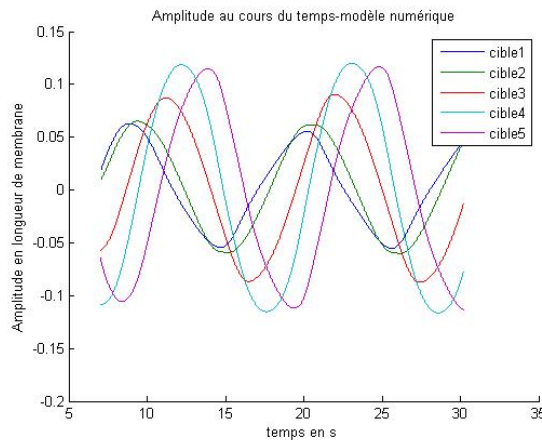


Figure 10 – Amplitudes du mouvement obtenu avec le modèle numérique 2D ($v=0.75$, $L_r=0.02\text{cm}$, $C=1 \text{ kg/s}$)

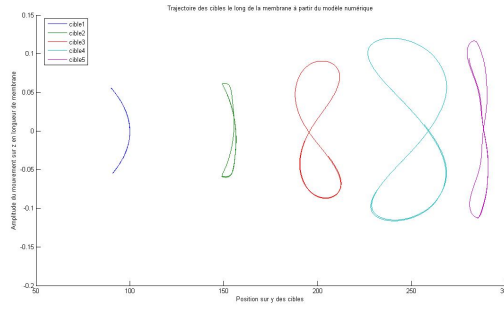


Figure 11 – Trajectoires des cibles le long de la membrane à l’aide du modèle numérique 2D

Sur la figure 11, on remarque que les variations d’amplitude sont les mêmes qu’expérimentalement c’est à dire que l’on a la plus petite amplitude au début, puis elle croit jusqu’à l’avant dernier point et enfin diminue au dernier point. De même, les trajectoires des points sont bien celles observées lors des essais. On a plutôt des arcs de cercle au début puis des "8" avec $0.23L$ de variation verticale et $0.016L$ de variation horizontale pour l’avant dernier point. Cela reste dans les ordres de grandeur observés. En accroissant l’amortissement, il est possible de diminuer le mouvement horizontal du dernier point.

On a décidé là aussi de faire varier les paramètres de longueur de câbles, de vitesse de courant et de charge au niveau du vérin. Et même s’il n’est pas encore possible de corréler parfaitement les essais expérimentaux et le modèle numérique, il s’avère que nous observons les mêmes tendances que précédemment pour ces trois paramètres ainsi que de bons ordres de grandeur en amplitude et en fréquence. On a donc un modèle à première vue réaliste de nos essais.

En plus des données de fréquence et d’amplitude, ce modèle numérique nous permet de comprendre ce qui passe dans le domaine fluide comme le montre les figures 12 et 13. Ainsi, nous pouvons récupérer les champs de pressions et de vitesses dans tout le domaine.

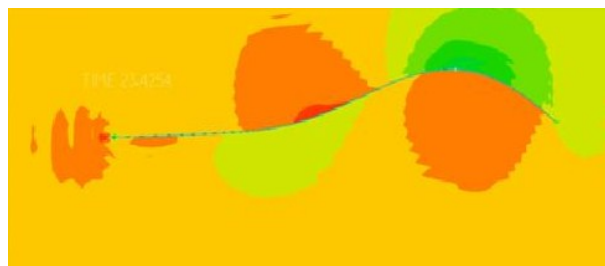


Figure 12 – Isocontours de pression le long de la membrane à $V = 0.75$ m/s

On observe sur la figure 12 des sur-pression (en rouge) à l’intérieur du rayon de courbure et des sous-pression (en vert) à l’extérieur du rayon de courbure. Ces différences de pression vont créer localement des aspirations qui vont contribuer à la déformation de la membrane jusqu’à ce qu’il y ait décrochage et que le mouvement s’inverse. Au contraire, la vitesse du fluide est plus élevée quand la pression est basse et inversement, comme le prévoit la relation de Bernoulli (Figure 13).

Pour l’instant, il n’est pas encore possible de superposer les deux modèles mais on

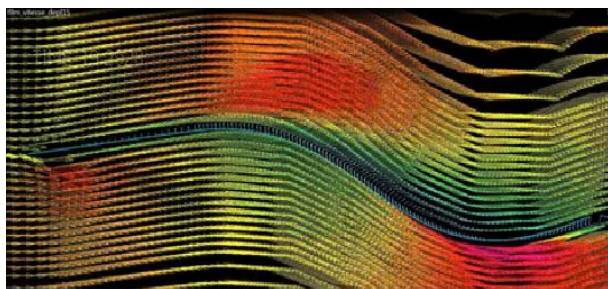


Figure 13 – Lignes de courant autour de la structure à $V = 0.75$ m/s

remarque déjà que les ordres de grandeur en amplitude et en fréquence sont respectés.

IV – Conclusion et perspectives

Les résultats expérimentaux, obtenus sur une maquette à l'échelle 1/6 et présentés dans ce document, ont permis de valider le concept de système de récupération de l'énergie des courants marins par une membrane ondulante. Afin d'optimiser le comportement du système, un modèle numérique 2D est en cours de développement. Les premiers résultats numériques sont en accord avec les résultats expérimentaux, en terme de fréquence et d'amplitude.

Par la suite, il est prévu d'améliorer le modèle numérique en essayant de réaliser un modèle le plus proche possible de notre maquette c'est à dire en déterminant quels sont les points de rotation, les degrés de liberté qui caractérisent notre maquette. Actuellement, nous comparons essentiellement les mouvements du système numérique et de la maquette mais le modèle fluide pourra lui aussi être validé à partir de mesures type PIV, LDV effectuées au bassin d'essais et qui, confrontées aux modèles numériques, seront une aide supplémentaire à la validation des simulations. Une étude de convergence devra également être menée afin de valider le modèle numérique. Nous confronterons les résultats obtenus par ce nouveau modèle aux résultats des essais et ajusterons les différents paramètres (matériaux, dimension, réglage...) afin de reproduire le plus fidèlement possible le comportement de notre système. Enfin, dans un troisième temps, nous nous servirons du modèle numérique pour optimiser les différents paramètres caractéristiques du système ainsi que la position et le réglage des convertisseurs. Ce réglage possible des convertisseurs apparaît dès cette première étude comme un atout majeur car il permettra de véritablement maximiser l'énergie récupérée en fonction de la vitesse du courant.

Remerciements

Les travaux de cette thèse sont co-financés par l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie et l'entreprise EEL Energy et supervisés par l'Ifremer.

Références

- [1] K.-J. Bathe and H. Zhang. Finite element developments for general fluid flows with structural interactions. *International journal for numerical methods in engineering*, 2004.

- [2] European Marine Energy Center. Tidal developers. <http://www.emec.org.uk/marine-energy/tidal-developers>, 2012.
- [3] G. Germain, F. Maganga, B. Gaurier, J.-V. Facq, G. P. Thomas Bacchetti, E. Rivoalen, and J. Etancelin. Vers une caractérisation réaliste des conditions de fonctionnement des hydroliennes. '12ième Journée de l'hydrodynamique', 2010.
- [4] R. Lagrange and C. Eloy. Etude théorique et expérimentale de la stabilité d un drapeau soumis à un écoulement parallèle à sa surface. Master's thesis, EGIM, Institut de recherche sur les Phénomènes hors équilibre, 2006.
- [5] M. Molki and K. Breuer. Oscillatory motions of prestained compliant membrane caused by fluid-membrane interaction. *Journal of fluids and structures*, 26 :339–358, 2009.
- [6] G. Pinon, P. Myceka, G. Germain, and E. Rivoalen. Numerical simulation of the wake of marine current turbines with a particle method. *Renewable Energy*, 2012.
- [7] F. O. Rourke, F. Boyle, and A. Reynolds. Marine current energy devices status and possible future applications in ireland. *Renewable and sustainable energy reviews*, 14 :1026–1036, 2010.
- [8] T. Sawada and T. Hisada. Fluid structure interaction analysis of the two-dimensional flag-in-wind problem by an interface-tracking ale finite element method. *Computers and fluids*, 2005.
- [9] M. Shelley and J. Zhang. Flapping and bending bodies interacting with fluid flows. *Annual Review of fluid Mechanics*, 43 :449–465, 2011.