



Science Arts & Métiers (SAM)

is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers Institute of Technology researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: <https://sam.ensam.eu>
Handle ID: <http://hdl.handle.net/10985/9564>

To cite this version :

Annie-Claude BAYEUL-LAINE, Gérard WILS, Sophie SIMONET - Modélisation numérique de l'hydrovoile Wils - International Journal of Scientific Research & Engineering Technology (IJSET) - Vol. volume3, issue1, 2ème conférence Internationale des énergies renouvelables CIER-2014, n°issue1, p.88-96 - 2015

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository

Administrator : scienceouverte@ensam.eu



MODELISATION NUMERIQUE DE L'HYDROVOILE WILS

Annie-Claude Bayeul-Lainé^{#1}, Sophie Simonet^{#2}, Gérard Wils^{#3}

^{#1} LML, UMR CNRS 8107, Arts et Metiers PARISTECH

8, Boulevard Louis XIV 59000 Lille, France

¹annie-claude.bayeul-laine@ensam.eu

²sophie.simonet@ensam.eu

^{#3}H.Y.D.L.

gerard.wils@hidl.biz

Résumé— Les hydroliennes permettent la transformation de l'énergie cinétique des courants marins et fluviaux en électricité. Le mouvement des mers et des cours d'eau étant une source quasi-inépuisable d'énergie, un développement important de la conception des hydroliennes dans le cadre du développement durable a vu le jour ces dernières années. La présente étude concerne une hydrolienne originale inventée et mise au point par M. Gérard Wils. Cet article propose de présenter le résultat d'une collaboration entre le Laboratoire de Mécanique de Lille, M. Gérard Wils, la région Nord Pas de Calais, Ifremer, l'Ecole des Mines de Douai et Ensait/Innotex dans le cadre d'un soutien CATTIC (Contrat d'accès au transfert de technologie et de compétences. A présent connue sous l'acronyme HYDL (hydrolienne à déplacement linéaire), l'originalité de cette hydrolienne consiste dans le fait que la récupération de l'énergie ne se fait pas au travers de la rotation d'une roue, mais par le déplacement de voiles placées à égale distance les unes des autres, reliées entre elles par deux câbles. Ces câbles transmettent l'effort récupéré sur chaque voile à deux tambours qui permettent la production de courant électrique. Le but de l'article est de présenter la modélisation numérique de cette hydrovoile à l'aide du code de calcul Star CCM+ et de donner un certain nombre de résultats caractérisant la performance de cette machine.

Mots clés— hydrolienne, hydrovoile, modélisation numérique, énergie renouvelable, récupération d'énergie

I. INTRODUCTION

Dans le cadre du programme Energie-Climat, l'Union européenne s'est fixé comme objectif de porter la part des énergies renouvelables à hauteur minimale de 27% dans sa consommation finale d'énergie en 2030. [1-3].

La consommation électrique mondiale a été de 20915 TWh en 2012 dont 482 Twh pour la France (source IEA, International Energy Agency [3], figure 1). En figure 1, la consommation finale d'énergie mondiale est représentée par source d'énergie, on peut remarquer que le pourcentage d'énergie renouvelable mondiale était de 3,5% de l'énergie totale consommée en 2012 (1Mtoe=1 million de tonne équivalent pétrole=11.63 TWh). Les chiffres d'énergie renouvelable pour la France sont de 16,4% de la production électrique nette électrique (541.4 Twh de production électrique nette dont 404.9 d'énergie nucléaire, 47.9 d'énergie

fossile, 63.8 d'énergie hydraulique, 14.9 d'énergie éolienne, 4 de photovoltaïque et 5.9 d'autres sources d'énergies renouvelables [4]).

Dans la production d'électricité par l'exploitation des énergies potentielles des flux d'eau, il faut distinguer les centrales hydroélectriques (centrales gravitaires ou stations de transfert d'énergie par pompage (STEP)) des centrales utilisant l'énergie de la mer (marémotrices, hydrolienne ou houlomotrices) [5-7]. Parmi les énergies de la mer, on peut citer les potentiels énergétique mondiaux, à savoir 300 TWh pour l'énergie marémotrice, 800 TWh (50 en Europe) pour les hydroliennes [2]. Pour information, concernant l'énergie marémotrice, la plus grande centrale connue à ce jour est l'usine marémotrice de la Rance dont la puissance installée est de 240 MW pour un facteur de charge de 25%, soit environ 2190h de production et une production énergétique d'environ 500 GWh. Ainsi le potentiel des énergies provenant des vagues, des énergies fluviales et marine est un gisement important dans la recherche de nouvelles sources d'énergie renouvelables, quasi-inépuisables et largement prévisibles.

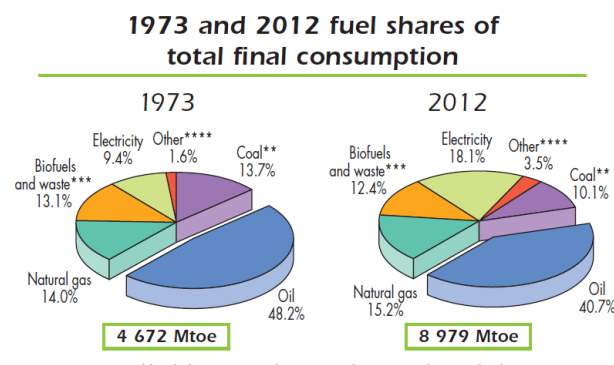


Fig. 1 Consommation finale d'Énergie par source d'énergie, « others »=énergies renouvelables (source IEA, [3])

Les principales zones d'intérêt en Europe sont la Manche, la mer du Nord et la mer d'Irlande. La France possède la deuxième ressource européenne après le Royaume-Uni, 20% de ce potentiel national (estimé à 3,5 GW) étant réparti entre la Bretagne et le Cotentin. Il s'agit d'une exploitation de

niches naturelles liées à la géographie côtière. En Europe, la côte nord-ouest depuis le Portugal jusqu'en Ecosse possède un potentiel énergétique parmi les plus élevés du monde (figure 2).

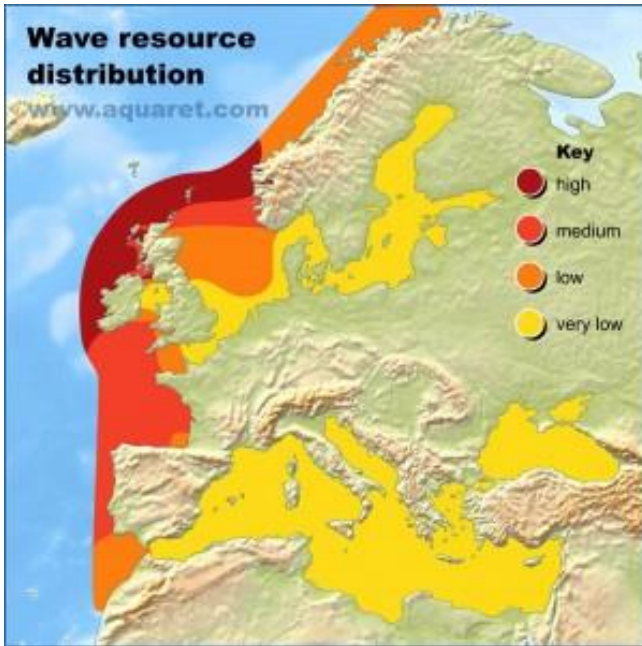


Fig. 2 Energie provenant des vagues. Gisement européen (source Emec [8])

Les technologies marines telles que les hydroliennes sont très prometteuses bien que peu avancées à ce jour. Certains projets en phase de pré-études sont toutefois très prometteurs et devraient atteindre le seuil de maturité industrielle économique vers 2015 ou 2020. Les hydroliennes transforment l'énergie cinétique des courants marins ou fluviaux en électricité. La forme des hydroliennes est diverse mais il s'agit souvent de machines axiales type hélices entraînées par les courants, fonctionnant sur le même principe qu'une éolienne. Ces hydroliennes comportent une roue à aubes ou une hélice constituée de pales montées sur un arbre dont la rotation (créée par le courant marin) entraîne une génératrice électrique. Elles peuvent être à axe horizontal ou à axe vertical. La masse volumique de l'eau étant environ 800 fois supérieure à celle de l'air, une hydrolienne est beaucoup plus petite qu'une éolienne à puissance équivalente [7-10]. Certaines hydroliennes sont installées sur un mât ancré dans les fonds marins. Les opérations de maintenance en sont facilitées pour peu que la hauteur du mât soit suffisante pour le faire émerger de la surface de la mer. En contrepartie, l'ancrage de ces mâts est délicat. L'autre façon d'installer une hydrolienne consiste à la monter sur un bâti constitué d'un tripode posé sur les fonds marins au moyen d'une barge. L'installation est simplifiée mais la maintenance nécessite la récupération complète du dispositif immergé. Enfin les hydroliennes peuvent être fixées sur un bâti flottant, ce qui facilite la maintenance.

L'hydrolienne à Déplacement Linéaire (HY.D.L), présentée ici est le fruit de réflexions de M. Gérard Wils, accompagné par l'incubateur des Mines de Douai APUI et Innotech [11]. Il s'agit d'un système à déplacement linéaire à voiles souples rétractables. L'originalité du dispositif réside dans le type d'hydrolienne et l'autonomie complète du système ; cette hydrolienne est montée sur flotteurs et son encombrement est réduit. De ce fait, cette hydrolienne est adaptée à l'exploitation des courants fluviaux, des courants marins, des vagues. Afin de valider le concept, un prototype a été mis au point. Ce prototype a également été testé grâce aux installations de l'Ifremer.

II. PARAMETRES ET PERFORMANCES

La puissance théorique maximale développée par un capteur hydrolien est donnée, comme pour les éoliennes, par la limite de Betz qui est une loi physique basée sur les grands principes de la mécanique des fluides (théorème de Bernoulli, théorème d'Euler). La puissance cinétique d'un fluide traversant un disque est proportionnelle à sa surface, donc au carré de son diamètre, à la masse volumique du fluide et au cube de sa vitesse. En pratique, la veine du fluide s'élargit au voisinage des pales de l'hydrolienne, ce qui fait chuter sa vitesse. Cette limite maximale est égale à 16/27 de la puissance incidente du courant qui traverse l'hydrolienne ([12], Le Gourières). Il faut en outre déduire les pertes de la machine liées aux frottements et à la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique, ce qui conduit à un rendement global inférieur à 40% (figure 3).

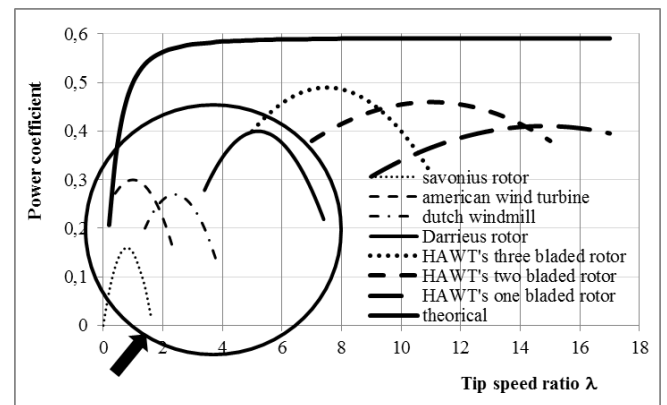


Fig. 3 Aerodynamics efficiencies of common types of wind turbines from Hau (2000)[10].

Pour une hydrolienne placée dans un courant de 2,5 m/s, si l'on souhaite obtenir une puissance de 1 MW, il faut une surface d'interception de l'ordre de 300 m²,

Les coefficients sans dimension classiques caractérisant les hydroliennes comme les éoliennes sont:

- Rendement ou coefficient de puissance C_p ,

$$C_p = P_{eff} / (\rho S V_0^3 / 2) \quad (1)$$

où P_{eff} est la puissance capturée par l'hydrolienne et $(\rho S V_0^3 / 2)$ est la puissance cinétique totale traversant la surface balayée (Fig. 3).

- Coefficient de vitesse λ

$$\lambda = V_v / V_0 \quad (2)$$

Où V est la vitesse de déplacement des voiles et V_0 la vitesse du courant

- Nombre de Reynolds R_e basé sur la longueur de l'aube et sur la vitesse relative d'écoulement

$$R_e = (V_0 - V_v) L / \nu \quad (3)$$

- Coefficient de force

$$C_F = F_D / (\rho S (V_0 - V_v)^2 / 2) \quad (4)$$

III. GEOMETRIE ET CAS TESTS

A. Description de l'hydrovoile

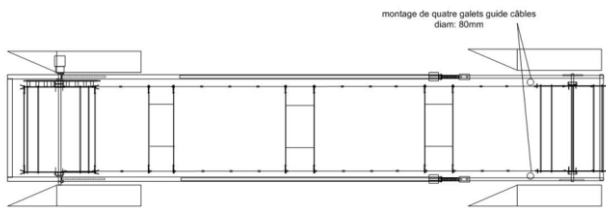


Fig. 4 Hydrovoile, vue de dessus

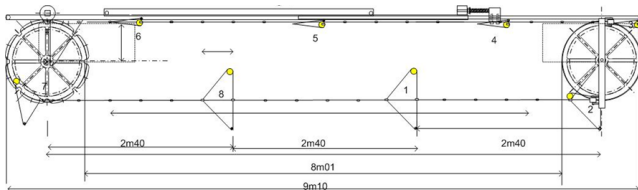


Fig. 5 Hydrovoile, vue latérale

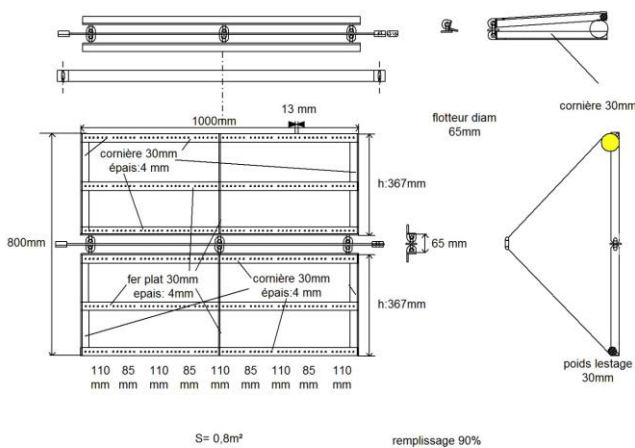


Fig. 6 Hydrovoile, détail des voiles

L'hydrovoile étudiée est représentée figures 4 à 7 IL s'agit d'une hydrolienne flottante constituée d'un cadre supérieur sur lequel sont fixées deux tambours. L'hydrovoile comporte plusieurs voiles situées à égale distance les unes des autres,

reliées entre elles par deux câbles et mises en mouvement par les courants marins. Ces câbles entraînent les deux tambours en rotation par rapport à la structure flottante. Ce mouvement de rotation permet la production de courant électrique (figures 8 à 10).

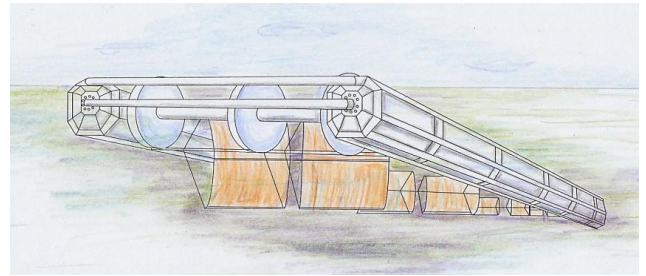


Fig. 7 Représentation de l'hydrovoile WILS (source H.Y.D.L. [11])

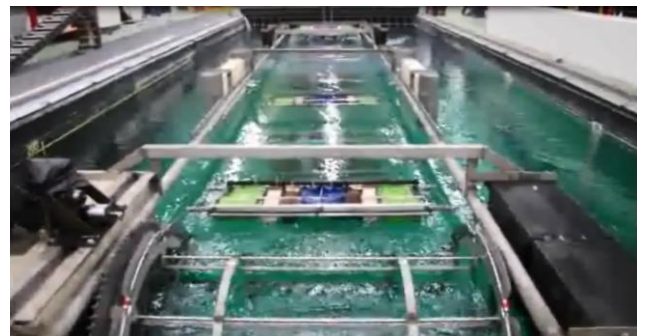


Fig. 8 Photo du prototype, vue de dessus

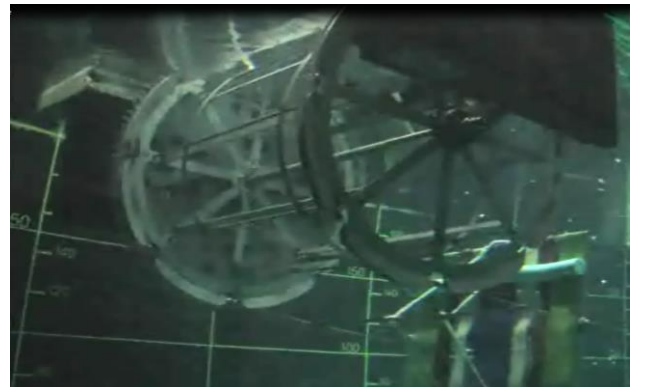


Fig. 9 Photo du prototype, vue de dessous



Fig. 10 Photo du prototype, vue de dessous : une voile ouverte à droite, une voile en cours d'ouverture à gauche

Les voiles ne sont pas pleines, elles comportent une partie de vide comme défini en figure 6 et ainsi qu'on peut le voir sur la figure 11.

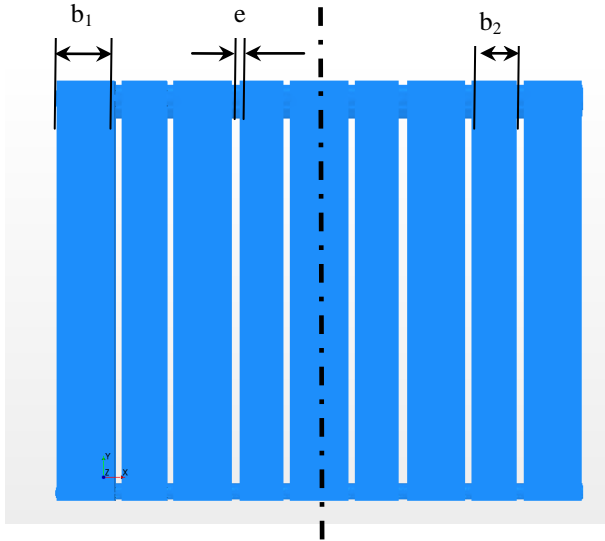


Figure 11 Allure des voiles (m=9)

B. Cas tests

Les paramètres étudiés dans l'étude numérique sont les suivants:

- Influence du nombre de Reynolds ($0.2 \cdot 10^6$, $1.1 \cdot 10^6$, $1.1 \cdot 10^6$, 2.10_6 , 3.10^6)
- Influence du nombre de voiles (de 3 à 5)
- Influence de l'écart entre voiles (2m, 2.4m, 2.8m, 3.2m, 3.6m, 4m, 8m)
- Influence du pourcentage de vide dans chaque voile, la largeur de voile étant toujours de 1m et le nombre de bandes égal à 9

TABLE I : MODELES DE VOILE

	m	b ₁ (mm)	b ₂ (mm)	e (mm)	% remplissage
Cas A	9	110	85	13.750	84
Cas B	8	75	75	57.143	60
Cas C	8	80	80	51.429	64
Cas D	8	85	85	45.714	68
Cas E	8	90	90	40.000	72
Cas F	8	95	95	34.286	76
Cas G	8	100	100	28.571	80

C. Modèles numériques

Compte tenu de la symétrie géométrique (figures 4 à 6), seule demi-structure est modélisée.

Les calculs ont été menés dans l'hypothèse d'un calcul tridimensionnel stationnaire (prise en compte du mouvement relatif courant/voile), donc dans l'hypothèse où les forces d'inertie sont nulles.

Toutes les simulations ont été effectuées avec le code de calcul Star CCM+ V8.02 en utilisant les équations de Navier Stokes moyennées et avec le modèle de turbulence k-ε.

Le domaine est divisé en deux sous-domaines: un domaine proche des voiles, maillé plus finement, et un domaine

extérieur suffisamment éloigné et tenant compte d'une taille maximale d'environ un million de cellules. Le domaine intérieur mesure 2 m de haut, 1 m de large et la longueur dépend de l'écartement entre voiles (à 2 m de chacune des voiles extrêmes, soit une longueur de $4+n \cdot e$ avec n, nombre de voiles et e, écartement entre voiles). Le domaine extérieur mesure 4 m de haut, 3m de large et la longueur est telle que l'entrée est située à 5 m de la première voile et la sortie à 15 m de la dernière voile ($=20+n \cdot e$).

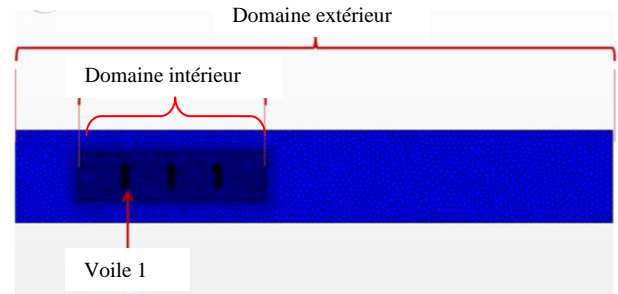


Figure 12 Maillage dans le plan de coupe longitudinal pour un écartement de 2.4 m et 4 voiles



Figure 13 Maillage d'une demi-voile

Le domaine fluide est modélisé avec un maillage polyédrique dont la taille cible des mailles est de 0,3 m dans le domaine extérieur et de 0,1 m dans le domaine intérieur. Afin de pouvoir définir finement la voile (flotteur, poids de lestage, cornière), une taille cible de 2cm et une taille minimale de 4 mm a été utilisée dans ces zones. Les maillages sont représentés sur les figures 12 et 13. Des mailles prismatiques (figure 14) ont été utilisées près des parois afin de mieux capturer la couche limite.

Le calcul a été réalisé sur une seule phase: l'eau. Donc la hauteur de 50 cm au-dessous du niveau de la surface libre n'est pas respectée et l'interaction avec la surface libre n'est pas prise en compte.

Les voiles sont supposées verticales et le courant est supposé uniforme et horizontal, les câbles sont supposés horizontaux. L'interaction câble, voile, fluide n'est pas prise en compte.

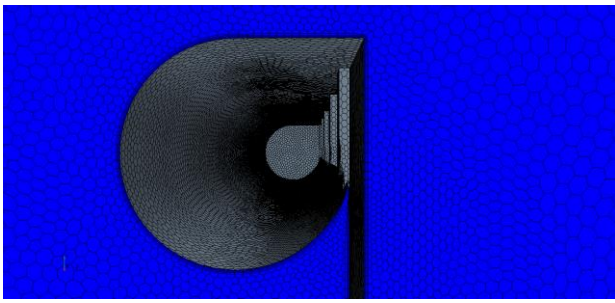


Figure 13 détail des mailles prismatiques près des parois dans le plan de symétrie

Les conditions aux limites du domaine extérieur: vitesse du courant à l'entrée, pression en sortie et plans de symétrie pour toute la surface latérale (évite de prendre des murs et permet de simuler une condition quasi infinie).

La voile est soumise à 5 forces: la force de trainée, la force de portance, la poussée d'Archimède, le poids et l'effort du câble. On recherche ici l'effort sur le câble puisque c'est celui qui va transmettre l'effort. La voile étant supposée verticale, les forces de portance, la poussée d'archimède et le poids sont supposés être en équilibre (Le poids n'est pas connu dans cette pré-étude numérique). L'effort sur les câbles est supposé égal et opposé à la force de trainée.

Chaque modèle comporte entre 1 million et 1,5 million de cellules, la différence entre chaque cas provient du fait que la taille du domaine évolue entre chaque cas mais la dimension de base du maillage est le même dans tous les cas.

L'influence des forces de pesanteur a été testée pour un modèle à 5 voiles, un écartement de 2,8 m et pour différentes vitesses de courant. Les forces de trainée obtenues (dans le sens du courant) avec et sans prise en compte de ces forces de pesanteur sont identiques, aussi les autres calculs ont été réalisés sans cette prise en compte. Bien évidemment, les forces de portance étaient quant à elles plus grandes puisqu'elles englobaient la poussée d'Archimède.

IV. RESULTATS DE CALCUL

A. Résultats globaux : coefficients de forces sur chaque voile

1) Influence du nombre de Reynolds

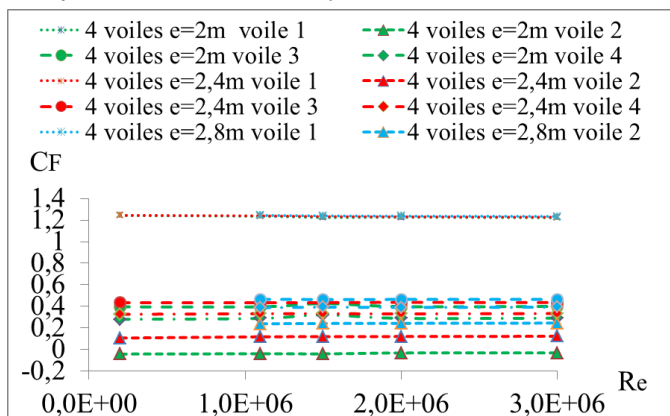


Figure 14 Coefficients de forces de chaque voile en fonction du nombre de Reynolds pour 4 voiles et différents écartements, cas A

Pour la configuration cas a du tableau 1, comme le montre la figure 14, le nombre de Reynolds a peu d'influence sur les résultats pour une hydrolienne comportant 4 voiles consécutives en fonction. Il a été démontré qu'il en était de même pour une hydrolienne à 5 voiles.

2) Influence de l'écartement entre voiles

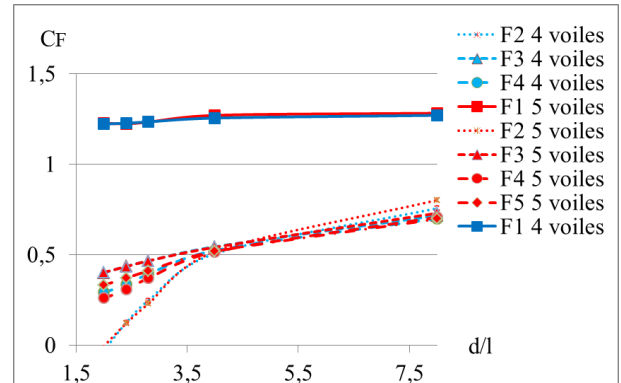


Figure 15 Coefficients de forces de chaque voile en fonction de la distance adimensionnelle entre voiles, cas A

Il peut être observé que la force sur la première voile est nettement supérieure aux forces constatées sur les voiles suivantes et que le coefficient de force étant supérieur à 1 (de l'ordre de 1,25), il prend en compte les forces de pression face au courant et les forces de dépression très importante sur la face interne. La deuxième voile fournit un effort très faible pour un écart relatif entre voiles inférieur à 4. Au-delà, l'effort est du même ordre de grandeur que les voiles 3, 4 et 5. Pour un écart relatif de 4, le coefficient de force des voiles 2 à 5 est de l'ordre de 0.55 et pour un écart relatif de 8, il est de l'ordre de 0.7. Dans tous les cas, la voile 1 fournit un effort quasi identique quels que soient le nombre de voiles et l'écartement entre voiles. Cet effort correspond à un coefficient de force de l'ordre de 1,25.

3) Influence du taux de remplissage des aubes

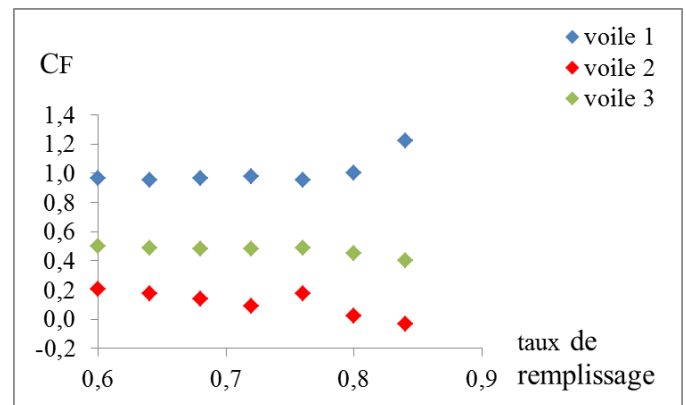


Figure 16 Coefficients de forces de chaque voile en fonction du taux de remplissage, cas A à G

Les calculs concernent ici les cas B à G pour lesquels le nombre d'éléments de voilure est de 8. Le cas A a été ajouté sur le diagramme présenté figure 16. Comme il a été démontré précédemment que l'effort sur les voiles 3 et les suivantes

étaient quasiment identiques, seules 3 voiles ont été modélisées pour les cas B à G. Les calculs ont été réalisés pour un nombre de Reynolds de $2 \cdot 10^6$ et une distance entre voiles de 2 m.

Une chute d'environ 25 points du coefficient l'effort produit par la voile 1, compensée par une augmentation de la voile 2 de 20 points et de 10 points pour la voile 3 peuvent être observées sur la figure ci-dessus quand le taux de remplissage passe de 84% à 60%. La diminution du taux de remplissage conduit donc à une augmentation de l'effort total pour un nombre de voiles supérieur ou égal à 1.

4) Influence combinée de l'écartement entre voiles et du taux de remplissage des voiles

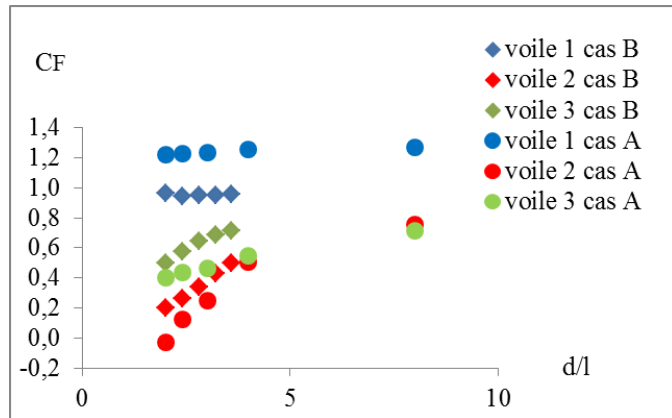


Figure 17 Coefficients de forces de chaque voile en fonction de la distance entre voiles, cas A et B

La puissance effective est égale à la force multipliée par la vitesse de déplacement des voiles

$$P_{\text{eff}} = F_D V = C_F \rho S \frac{(V_0 - V_v)^2}{2} V = C_F \rho \lambda S \frac{(V_0 - V_v)^2}{2} V_0 \quad (5)$$

Ce qui donne simplement pour le coefficient de performance

$$C_p = C_F \lambda (1 - \lambda)^2 \quad (6)$$

En considérant le taux de remplissage des voiles, celui du cas B, en prenant un écart adimensionnel de voiles de 3.6, on peut estimer le coefficient de force à l'aide la formule suivante

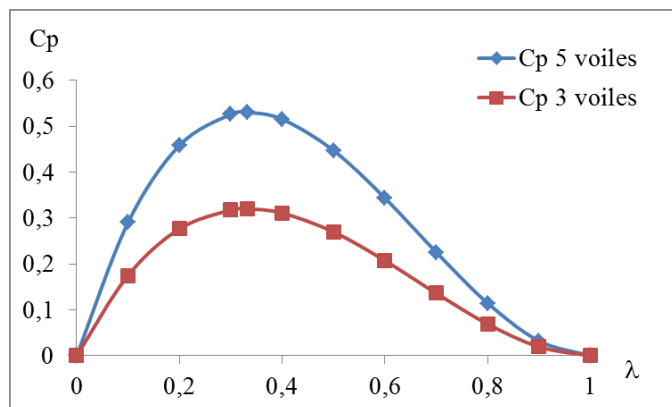
$$C_F = 0.95 + 0.5 + (n - 2) * 0.71 \quad (7)$$


Figure 18 Coefficients de performance (cas B)

Soit un coefficient de force de 2,16 pour 3 voiles et de 3.58 pour 5 voiles. Pour un choix donné de nombre de voiles, d'écart entre deux voiles, le coefficient de force est donc connu et la valeur maximale de C_p dépend du maximum de $\lambda(1-\lambda)^2$ dont la valeur maximale est obtenue pour $\lambda = 1/3$ par résolution mathématique. Cela donne un coefficient de performance d'allure classique représenté en figure 18. Ainsi la puissance maximale hydraulique développée par l'hydrovoile est de $4,28 \text{ kW/m}^2$ balayé par la machine pour 3 voiles et de $7,1 \text{ kW/m}^2$ pour 5 voiles, pour une vitesse de courant de 3m/s. Pour cette vitesse de courant, la vitesse de déplacement optimal des voiles est de 1m/s.

B. Résultats locaux

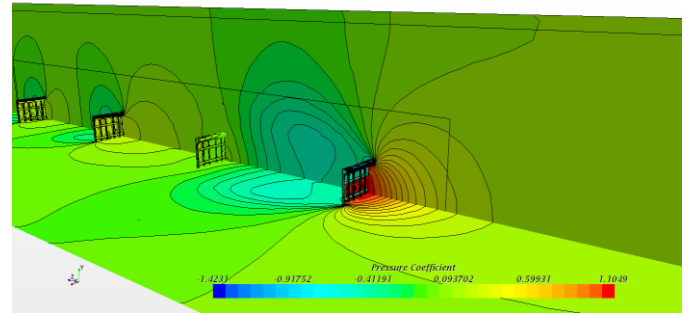


Figure 19 Coefficient de pression (cas A, écart 2.4m)

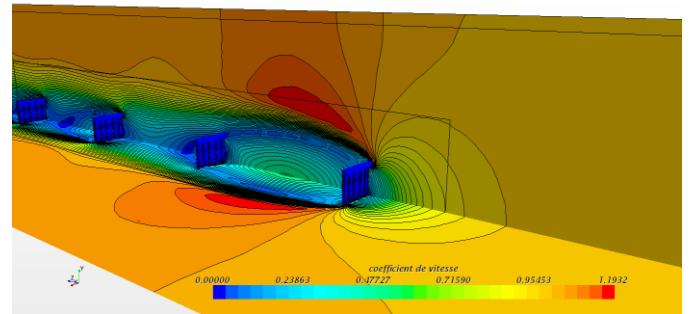


Figure 20 vitesse adimensionnelle= V/V_0 (cas A, écart 2.4 m)

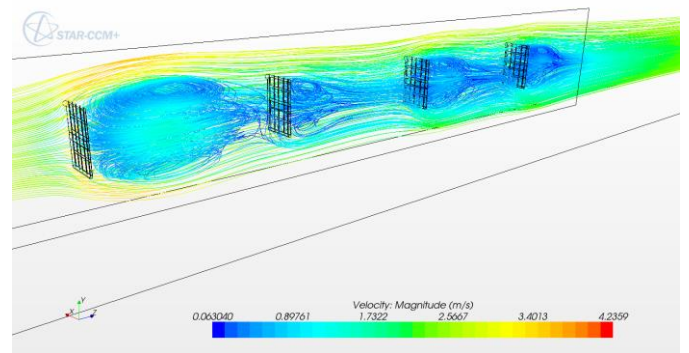


Figure 21 lignes de courant (cas A, écart 2.4m)

L'examen des coefficients de pression (figure 19) permet de comprendre pourquoi le coefficient de force sur la première voile peut être supérieur à 1: il est le résultat des forces de pression face au courant, mais aussi le résultat des forces de dépression sur l'autre face de la voile. La dépression entre les

voiles 1 et 2 permet d'expliquer la faiblesse de l'effort sur la voile 2 pour de faibles valeurs de l'écart entre les voiles. La présence des voiles entraîne une suritesse à l'extérieur de l'hydrovoile surtout entre les voiles 1 et 2 et une réduction notable de la vitesse (plus de 50%) entre les voiles (figure 20). Enfin la présence des voiles génère des tourbillons en aval de chaque voile (4 tourbillons symétriques) avec des tourbillons beaucoup plus intenses entre les voiles 1 et 2 (figure 21).

V. COMPARAISONS AVEC LES ESSAIS EN BASSIN

Les essais ont été réalisés dans le bassin à circulation d'eau d'Ifremer. La veine est constituée d'une boucle d'eau verticale de section rectangulaire contenant 700 m³ d'eau. Les pompes assurent une vitesse de courant comprise entre 0.15 et 2 m/s. La dimension de la veine est : L=18m, l=4m, h=2m, la longueur d'observation étant de 8m comme montré dans la figure 22. Le premier prototype (figure 23) comprend deux voiles consécutives de 0.56 m² de surface balayée.

Les premiers essais réalisés avec une vitesse de courant de 1,4 m/s conduisent à un coefficient de force sur la première voile égal à 1.55 pour un taux de remplissage de 70%, soit un C_F supérieur à celui trouvé dans la figure 16.

L'étude de l'influence de l'écart entre deux voiles conduit à un effort maximal sur la deuxième voile tel que $C_F 2^{\text{ème voile}} = 68\% C_F 1^{\text{ère voile}}$, résultat en bon accord avec les calculs (Cf figure 17).

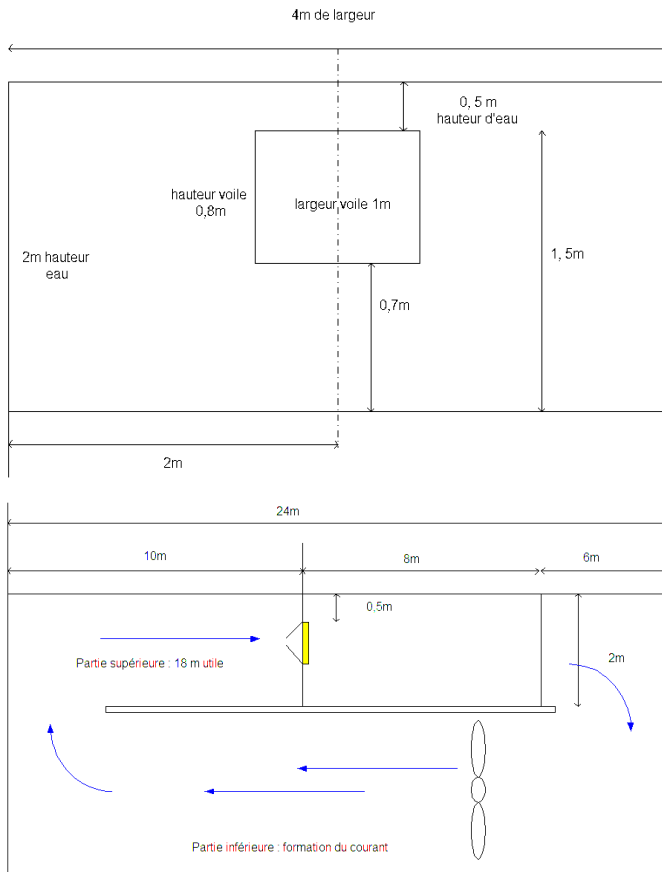


Figure 22 Position de l'hydrovoile dans le bassin d'essai



Figure 23 Premier prototype

La différence entre essais et calculs pourrait s'expliquer par le fait que la présence des murs, du sol et de la surface libre renvoie le fluide sur la deuxième voile. A cet effet, une modélisation du bassin a été réalisée (pour $e=2,4m$). Le coefficient de force obtenu sur la voile 1 est de 1.55, ce qui est en bon accord avec les résultats expérimentaux. Cependant la force sur la voile 2 est quasiment nulle, en corrélation avec le champ de pression observé numériquement (figure 24)

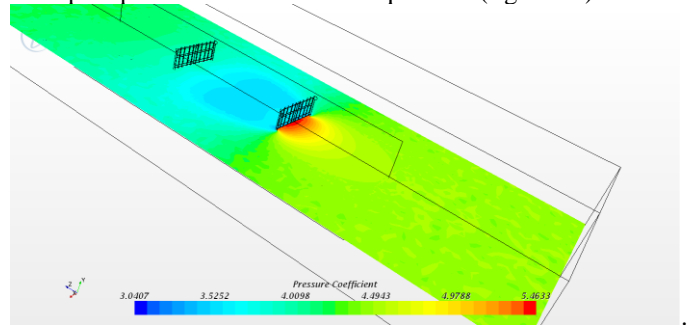


Figure 24 coefficient de pression du modèle représentatif des essais en bassin

La différence entre essais et calculs en ce qui concerne la voile 2 pourrait s'expliquer par le fait que les voiles ne sont pas vraiment dans l'alignement l'une de l'autre dans les essais et qu'elles ne soient pas parfaitement perpendiculaires au courant. D'autre part, n'étant pas parfaitement perpendiculaire au courant, la force sur le câble est une combinaison de la force de traînée et de portance qui tient compte de l'interaction entre les trois éléments : le câble, la voile et le fluide.

VI. CONCLUSIONS

Cette étude a permis d'obtenir les coefficients de forces qui s'exercent sur chaque voile d'un ensemble de voiles alignées en « milieu infini ». Elle a permis de montrer :

- que le coefficient de force de la voile 1 est le plus important

- que plus on écarte les voiles, plus on récupère d'énergie sur les voiles suivantes (plus les coefficients de force sont grands).

- que le taux de remplissage des voiles est important, le meilleur compromis obtenu entre diminution du coefficient sur la première voile et augmentation du coefficient sur les voiles suivantes est 60%.

- que la vitesse du courant a peu, pour ne pas dire pas, d'influence sur le coefficient de force

Une analyse du coefficient de performance a permis d'établir un parallèle avec les hydroliennes classiques, type Darrieus, par exemple. Cette analyse a mis en évidence que la performance d'une telle machine peut être supérieure aux hydroliennes Darrieus. Pour une hydrovoile comportant 5 voiles en travail, avec un taux de remplissage de 60% et un écart entre voiles de 3.6 m, les calculs prévoient un coefficient de performance de plus 52%.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient la région Nord Pas de Calais et Innotech pour le soutien financier de cette étude.

Ils remercient également M. de Lesquen pour sa contribution à cette étude.

NOMENCLATURE

b1	largeur 1 bande voile	(mm)
b2	largeur bande 2 voile	(mm)
C _p	Coefficient de puissance	(-)
e	écart entre bandes voiles	(mm)
F _D	Force de traînée	(N)
F _L	Force de portance	(N)
L	longueur de la voile	(m)
m	nombre d'éléments de voilure	(-)
n	nombre de voiles	(-)
P _{eff}	Puissance effective	(W)
R _e	Reynolds number based on length of blade	(-)
S	Surface balayée par les voiles	(m ²)

V ₀	Vitesse du courant	(m/s)
V _v	Vitesse linéaire des voiles	(m/s)
V ₀ -V _v	vitesse relative du courant	(m/s)
λ	vitesse adimensionnelle	(-)
ρ	Masse volumique de l'eau,	(kg/m ³)
ν	vicosité cinématique	(m ² /s)

REFERENCES

- [1] (2014) <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Paquet-Energie-Climat-2030-Par-1.html>, Brochure_climat2013.pdf (2014)_
- [2] (2014) <http://www.connaissancedesenergies.org/>, Fondation d'entreprises Alcen pour la connaissance des énergies
- [3] (2014) www.iea.org, Key words energy statistics, 2014
- [4] (2012), <http://www.rte-france.com>, RTE, bilan électrique 2012
- [5] OECD (2014), "Approvisionnement en énergie primaire" (indicator), DOI: [10.1787/b50d5b5e-fr](https://doi.org/10.1787/b50d5b5e-fr), (Accessed on 27 October)
- [6] (2014), <http://www.oecd-ilibrary.org>/France Energies Marines (2013). Guide d'évaluation des impacts environnementaux pour les technologies hydroliennes en mer : GHYDRO / Guide to the environmental impact evaluation of tidal stream technologies at sea : GHYDRO. <http://dx.doi.org/10.13155/29025>
- [7] (2014) <http://www.france-energies-marines.org/Les-energies-marines-renouvelables/L-energie-des-courants-marins>
- [8] (2014), <http://www.aquaret.com>
- [9] (2009) http://www.bretagne.fr/internet/upload/docs/application/pdf/2009-03/rapport_energies_marines_complet_v2.pdf
- [10] (2014) <http://www.emec.org.uk/marine-energy/>
- [11] (2012) <http://hydl.biz/wp-content/uploads/2012/08/Avantages-HY.D.Lcourant1.pdf>
- [12] D. le Gourières, *Les éoliennes, théorie, conception et calcul pratique*, Editions du Moulin Cadiou, mars 2008, ISBN 9782953004106
- [13] E. Hau, *Wind turbines*, Springer, Germany, 2000