

HAO-Laval : Le projet d'hydrolienne à ailes oscillantes

Turbines hydroliennes et efficacité

Tout comme les éoliennes, les hydroliennes sont des machines destinées à produire de l'électricité à partir des courants d'eau de façon durable et écologique. Elles ne requièrent aucun barrage et leur signature environnementale est minimale. Elles peuvent s'utiliser dans les courants continus de rivières ou de fleuves, ou encore dans les courants de marée à des endroits propices le long des côtes. Bien que cycliques, ces derniers demeurent facilement prévisibles dans le temps. La prévisibilité de la ressource hydrolienne de même que son abondance sont d'ailleurs des atouts importants de cette filière d'énergie renouvelable par rapport aux éoliennes.

La densité énergétique supérieure d'un courant d'eau typique par rapport au vent est également un avantage souvent mis de l'avant en faveur de l'hydrolien (voir Fig. 1). En effet, il faut savoir que la puissance extraite par ces machines, aussi bien éoliennes qu'hydroliennes, correspond toujours à une fraction du flux d'énergie cinétique contenu dans l'écoulement. On peut la calculer cette puissance comme

$$P_{\text{extraite}} = \eta \frac{1}{2} \rho U^3 A$$

qui dépend directement de la densité ρ du fluide, de la vitesse de l'écoulement U_∞ au cube, et de la surface frontale A de la turbine qu'on dénomme souvent la « fenêtre d'harnachement ». La puissance extraite dépend également du coefficient d'efficacité η qui est fondamentalement fonction du design spécifique de la turbine et de sa fréquence d'opération par rapport à la vitesse de l'écoulement.

C'est ce paramètre η que l'on cherche à optimiser en pratique, aussi bien sur les concepts traditionnels de turbines à pales rotatives (turbines à axe horizontal ou à axe vertical; voir les sites [1,2] pour des exemples) que pour les nouveaux concepts comme celui que nous considérons ici à ailes ou à pales oscillantes. Une théorie simple permet d'établir que la valeur maximale de ce coefficient est de 59% (limite de Betz). En pratique, un coefficient d'efficacité atteignant 40% est jugé excellent.

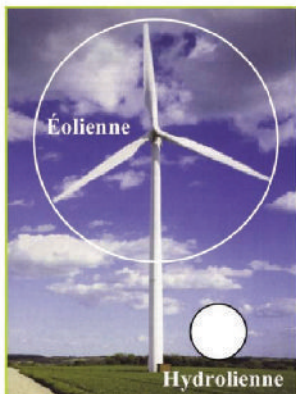


Figure 1 – Densité énergétique supérieure : pour une même puissance, une hydrolienne dans un courant d'eau de 2 m/s aura une surface 20 fois plus petite qu'une éolienne dans un vent de 25 km/hr.

Il est important de rappeler que l'efficacité hors-tout d'une hydrolienne, appelée « water-to-wire efficiency » en anglais, dépend aussi de l'efficacité du convertisseur mécanique et de l'efficacité du générateur électrique. Jusqu'à maintenant dans le projet HAO-Laval, ces deux dernières efficacités n'ont pas été ciblées. L'essentiel de l'effort a été dirigé vers l'optimisation et la démonstration de l'efficacité hydrodynamique η du concept.

Turbine à ailes oscillantes – Principe et avantages

Une turbine à ailes oscillantes est constituée d'une ou plusieurs ailes rectangulaires, de profil symétrique, installées à l'horizontal, et qui effectuent un mouvement cyclique de pilonnement dans la verticale (voir Figs. 2 et 3). Ce mouvement est induit par la force de portance créée par l'écoulement autour de chaque aile. Cette force dépend de l'angle d'attaque des ailes: un angle effectif positif créant une portance positive vers le haut, un angle négatif poussant l'aile vers le bas. Ainsi, en contrôlant l'angle d'attaque des ailes (le tangage de l'aile) au cours d'un cycle de pilonnement (montée-descente), on assure une portance qui travaille dans le même sens que le pilonnement instantané, extrayant ainsi de l'énergie à l'écoulement. Le lecteur est invité à consulter le site [3] qui détaille et illustre ce principe en mouvement.

Un couplage mécanique entre les mouvements de pilonnement et de tangage de l'aile oscillante est donc requis. Ce système mécanique servira de plus à convertir le mouvement oscillant en mouvement rotatif, permettant ainsi d'entraîner le générateur électrique.

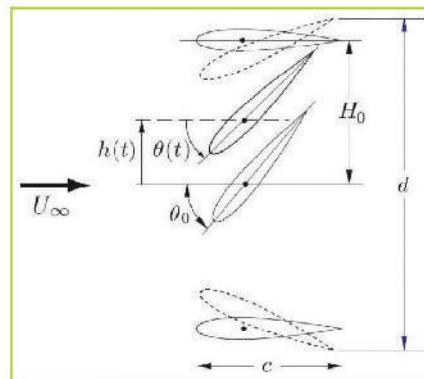


Figure 2 – Mouvements de pilonnement et de tangage : typiquement $H_0 \approx c$, et $\theta_0 \geq 50^\circ$.

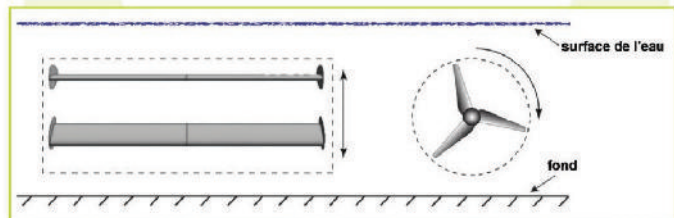


Figure 3 – Turbines vues de face : La fenêtre d'harnachement rectangulaire de la turbine à ailes oscillantes est un avantage marqué pour son utilisation en eau peu profonde et pour sa mise à l'échelle aux grandes puissances.

Contrairement aux turbines à axe horizontal (pales rotatives), la turbine à ailes oscillantes se caractérise par des pales qui travaillent uniformément sur toute leur envergure et qui bénéficient d'une hydrodynamique instationnaire (tourbillon bord d'attaque, décrochage dynamique, etc) permettant d'atteindre des coefficients de force supérieurs [4]. En plus de ce potentiel d'efficacité accrue, le principe des turbines à ailes oscillantes offre les avantages suivants :

1. Fenêtre d'harnachement rectangulaire qui s'avère beaucoup mieux adaptée au fond marin et aux eaux peu profondes en rivière ou le long des côtes (Fig. 3);
2. Une augmentation de puissance (mise à l'échelle) par l'augmentation d'envergure qui n'exige pas plus de profondeur d'eau;
3. L'utilisation de pales symétriques et sans gauchissement, de forme rectangulaire, faciles et peu coûteuses à fabriquer.

Analyse et optimisation du concept

Plusieurs approches numériques et expérimentales novatrices ont été développées à l'Université Laval au cours des six dernières années pour permettre l'investigation de la riche physique des turbines à ailes oscillantes et ouvrir la voie à leur optimisation [3]. La figure 4 illustre quelques-unes de ces approches dont le prototype de table (PTAO) testé en soufflerie, ainsi que le montage à aile oscillante (MAO) pour la validation de principe en canal hydraulique (photographié ici sans eau).

L'utilisation des outils de simulation numérique les plus avancés dans le domaine CFD (Computational Fluid Dynamics) et le recours à de vastes grappes d'ordinateurs pour le calcul haute performance ont significativement contribué à nos avancées [4]. Des simulations typiques peuvent exiger jusqu'à une semaine de temps calcul en continu sur les ordinateurs. Tous les détails instantanés des écoulements, les niveaux de turbulence et les phénomènes de séparation sont cependant révélés [4] permettant de faire des choix de conception et d'opération quasi-optimaux quant aux principaux paramètres impliqués.

Grâce à une subvention de recherche de 3 ans du programme d'équipe du Fonds Québécois pour la Recherche sur la Nature et la Technologie (FORNT), nous avons développé, fabriqué et testé un prototype complet de 2 kW afin de confirmer et quantifier l'efficacité hydrodynamique du concept.

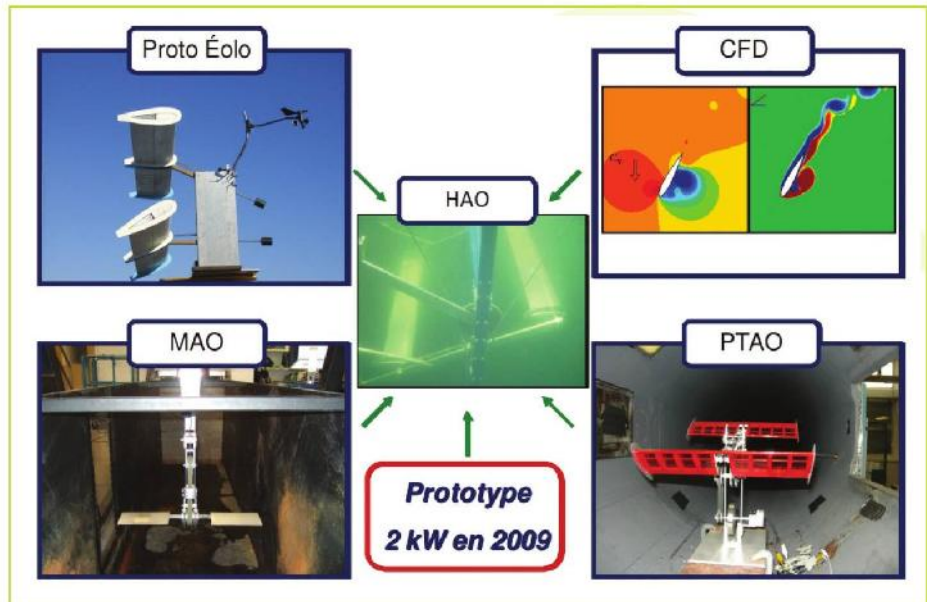


Figure 4 – Analyse et optimisation à l'aide de simulations CFD, d'essais expérimentaux en canal hydraulique (MAO) et de divers prototypes à petite échelle dans l'air et dans l'eau.

Campagne d'essais du prototype HAO-Laval et Résultats

Le prototype HAO-Laval qui a été testé au cours de l'été et de l'automne 2009 est illustré à la figure 5. Il est constitué de 2 ailes dans une configuration tandem et qui oscillent en déphasage de 180°. Celles-ci sont mécaniquement couplées à un arbre rotatif à l'aide de mécanismes à 4 barres. Cet arbre rotatif opère hors de l'eau et est connecté à un générateur électrique (non illustré) asservi en vitesse. Plus de détails sont disponibles sur le site Internet [3] et dans l'article [5].

Afin d'obtenir la meilleure qualité d'écoulement possible pour ces tests, en ce qui a trait au niveau de turbulence et à l'uniformité spatiale de la vitesse, et afin de permettre également un contrôle discrétionnaire de la vitesse de l'écoulement (de 1 à 2 m/s), il a été décidé de

réaliser ceux-ci en tractant la turbine sous un ponton dans un plan d'eau sans courant. Le Lac Beauport dans la région de Québec a offert des conditions d'essais idéales. Les mesures effectuées ont confirmé la très bonne qualité d'écoulement à 2 m sous la surface, au niveau de la turbine, et l'excellente « reproductibilité » des résultats.

Pour déterminer l'efficacité hydrodynamique η du prototype HAO-Laval, un ordinateur de bord faisait l'acquisition lors des essais (d'une durée d'environ 1 minute chacun) des valeurs instantanées du couple τ à l'arbre du générateur, de la vitesse de rotation Ω de l'arbre, et de la vitesse du ponton par rapport à l'eau dénoté ici U_∞ (constante durant un même essai mais qui pouvait être variée d'un essai à l'autre). Ces mesures permettent de déterminer l'efficacité au niveau du générateur pour la fréquence d'opération testée (entre 0.3 et 1.3 Hz).

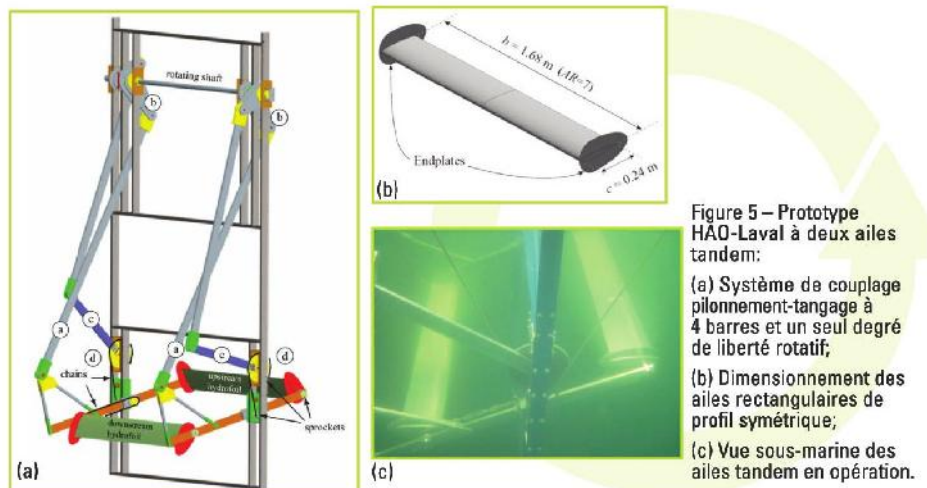
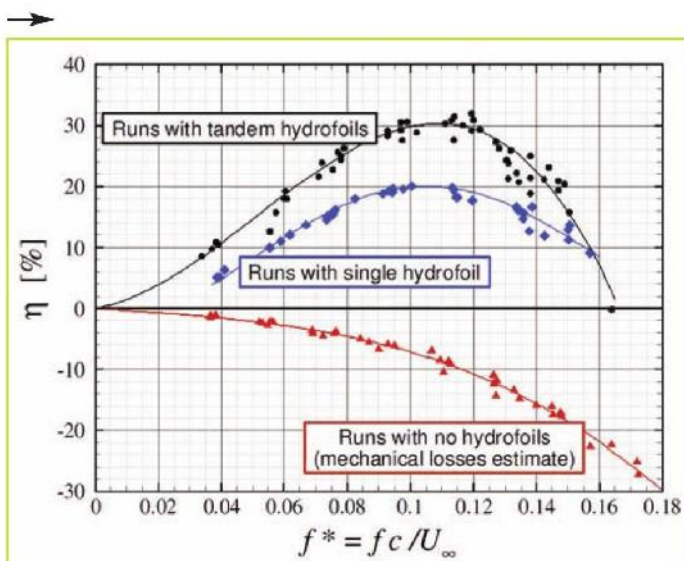
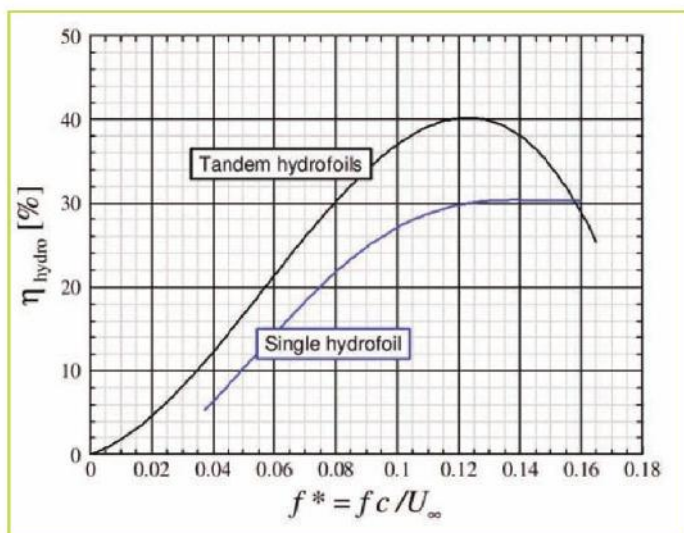


Figure 5 – Prototype HAO-Laval à deux ailes tandem:

- (a) Système de couplage pignon-tangage à 4 barres et un seul degré de liberté rotatif;
- (b) Dimensionnement des ailes rectangulaires de profil symétrique;
- (c) Vue sous-marine des ailes tandem en opération.



(a)



(b)

Figure 6 – (a) Efficacité brute mesurée à différentes fréquences normalisées pour les configurations à deux ailes (tandem), à une seule aile, et à aucune aile; (b) Efficacité hydrodynamique nette (estimé minimal) pour les configurations tandem, et à une seule aile.

Les principaux résultats sont synthétisés à la figure 6(a) en fonction de la fréquence normalisée f^* . Le lecteur remarquera sur cette figure, en plus des points noirs pour la turbine tandem, deux autres ensembles de mesures. Les losanges bleus correspondent à une version modifiée de la turbine obtenue en retirant l'aile aval de la paire tandem. Ils correspondent donc à une turbine à une seule aile oscillante. Finalement, les triangles rouges correspondent au cas où les deux ailes ont été retirées. Dans ce dernier cas, le générateur électrique devient moteur et entraîne le système mécanique, conduisant bien sûr à des efficacités négatives mais qui permettent d'obtenir un estimé minimal des pertes mécaniques dans le convertisseur.

De cette façon, on obtient enfin les résultats recherchés, soient les efficacités hydrodynamiques du concept de turbine à ailes oscillantes tels que présentés sur la figure 6(b). On y observe une efficacité

maximale de 40% à une fréquence normalisée d'environ 0.12. Cette efficacité maximale atteint 30% pour le cas d'une turbine à une seule aile, en excellent accord avec les prédictions théoriques obtenues par simulations CFD [5].

Conclusions et travaux futurs

Ces résultats permettent de démontrer formellement que le concept de turbines à ailes oscillantes offre des performances comparables aux meilleures technologies existantes. Compte tenu de ses avantages intrinsèques, soient : 1- fenêtre d'amarrage rectangulaire, 2- géométrie de pale simple, et 3- grandes puissances possibles en eaux peu profondes, la poursuite du développement de la technologie HAO nous semble pleinement justifiée et souhaitable.

Les travaux en vue du développement d'un nouveau prototype de 2^e génération sont déjà entrepris. Nous souhaitons cette fois un prototype plus puissant, d'environ 25 kW, qui pourrait être testé dans les courants de marée du fleuve St-Laurent. L'optimisation visera principalement, à cette étape-ci, la conception du système de couplage pilonnement-tangage et de conversion mécanique. ■

Remerciements

L'auteur souhaite remercier les nombreux collaborateurs à l'Université Laval qui ont contribué à ce projet au fil des ans, en particulier messieurs T. Kinsey, G. Lalande et M.-A. Campagna, étudiants gradués extraordinaires, les professeurs J. Lemay, J. Ruel et P. Viarouge, ainsi que monsieur Y. Jean, professionnel en mécanique au Département de génie mécanique. Le support de la municipalité de Lac Beauport, de la Société de valorisation SOVAR ainsi que le soutien financier du Fonds québécois FQRNT (Programme Équipe) et du Conseil national de recherche CRSNG (Programme de Subvention à la Découverte) sont également reconnus et sincèrement remerciés.

Références

- [1] Association canadienne Ocean Renewable Energy Group (OREG) : <http://www.oreg.ca>
- [2] Association européenne European Marine Energy Center (EMEC) : <http://www.emec.org.uk>
- [3] Site du projet HAO-Laval : <http://hydrolienne.fsg.ulaval.ca/>
- [4] Kinsey T. & Dumas G. (2008): "Parametric Study of Oscillating Airfoils in Power Extraction Regime", AIAA Journal, 46, no. 6, June 2008, pp. 1318-1330.
- [5] Kinsey T. & Dumas G. (2010) : "Testing and Analysis of an Oscillating Hydrofoils Turbine Concept", Paper ASME-FEDSM-ICNMM2010-30869, ASME Summer Meeting, 10th Inter. Symp. on Fluid Power, Montreal, August 2010.

