



**HAL**  
open science

## Optimisation d'une ferme d'hydrolienne à axe de rotation transverse

Sylvain Antheaume, Thierry Maître, Jean-Luc Achard

► **To cite this version:**

Sylvain Antheaume, Thierry Maître, Jean-Luc Achard. Optimisation d'une ferme d'hydrolienne à axe de rotation transverse. CFM 2007 - 18ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2007, Grenoble, France. hal-00267671

**HAL Id: hal-00267671**

**<https://hal.science/hal-00267671v1>**

Submitted on 2 Sep 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## Optimisation d'une ferme d'hydrolienne à axe de rotation transverse

Sylvain Antheaume, Thierry Maître & Jean-Luc Achard

Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels  
BP 53 38041 Grenoble  
sylvain.antheaume@hmg.inpg.fr

### Résumé:

*La présente étude s'intéresse dans un premier temps au rendement d'une tour d'hydroliennes à axe de rotation vertical en configuration isolée. Les calculs sont effectués au moyen d'un code développé au laboratoire LEGI qui couple un calcul Navier-Stokes 2D de l'écoulement général à une description macroscopique de la turbine. Cette méthode est validée par comparaison avec des résultats expérimentaux d'une éolienne de type Darrieus. Cette même tour est ensuite insérée dans un alignement de plusieurs tours qui forment ainsi un faisceau. Les résultats montrent que le rapprochement des tours profite au rendement moyen du faisceau. On procède enfin à l'étude de configurations spatiales de parcs marins composés de plusieurs faisceaux.*

### Abstract :

*The present study deals with the efficiency of cross flow water current turbine. First, we look at a tower configuration for free fluid flow conditions. The simulation is carried out with a new in house code which couple a 2D Navier-Stokes computation of the flow with a macroscopic description of the turbine. This method is validated with experimental results of a Darrieus wind turbine. The tower is then inserted into a gathering of several lined up towers which makes a cluster. The results show that the closer the towers, the better the average cluster efficiency. Eventually, we investigate marine farm performances for different clusters arrangements.*

### Mots-clefs :

**Hydrolienne à axe de rotation vertical, modèle macroscopique, rendement**

## 1 Introduction

Le laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels de Grenoble a lancé en 2001 un programme de recherche concernant les systèmes récupérateurs de l'énergie cinétique des courants fluviaux ou marins. Plus précisément, ce programme HARVEST (Hydroliennes à Axe de Rotation Vertical STabilisé) a pour objectif le développement de parcs hydroélectriques composés de turbines à flux transverse (hydroliennes) dont un des intérêts est d'être indifférentes à la direction du courant incident. Cet avantage est particulièrement intéressant pour les courants marémoteurs qui peuvent être giratoires. Le LEGI a proposé un concept de parc dont l'unité de base est une colonne verticale contenant un empilement d'hydroliennes rendues solidaires d'un même axe de rotation

et maintenue par une structure rigide de façon à former une tour. Une seule génératrice est nécessaire, située à l'extrémité supérieure de la tour. Un tel arrangement permet d'exploiter le courant sur toute la hauteur de la section. Les tours peuvent être regroupées en faisceau, maintenu en sa partie inférieure par un ancrage commun et au niveau supérieur par une barge immergée ou semi-immersée. Plusieurs faisceaux forment un parc. Ce papier présente tout d'abord les résultats de la modélisation 2D d'une hydrolienne à axe de rotation transverse. Nous nous intéresserons ensuite aux rendements globaux de faisceaux de tours puis de parcs marins.

Le fonctionnement d'une turbine est caractérisé par les quantités suivantes : le couple au niveau du rotor  $Q$ , la traînée  $D$ , la vitesse angulaire  $\omega$  et la puissance délivrée  $P = \omega Q$ . Par analyse dimensionnelle, ces quantités peuvent être transformées en nombres adimensionnels de la manière suivante :

$$\lambda = \omega R / U_{\text{inf}} \quad \text{Vitesse spécifique} \quad (1)$$

$$C_P = P / \left( \frac{1}{2} \rho U_{\text{inf}}^3 S_{\text{ref}} \right) \quad \text{Rendement} \quad (2)$$

$$C_D = P / \left( \frac{1}{2} \rho U_{\text{inf}}^2 S_{\text{ref}} \right) \quad \text{Coefficient de traînée} \quad (3)$$

avec  $R$  le rayon maximal de la turbine,  $U_{\text{inf}}$  la vitesse du courant incident,  $\rho$  la masse volumique de l'eau et  $S_{\text{ref}}$ , le maître couple de référence (dans le cas présent  $S_{\text{ref}} = RH$ )

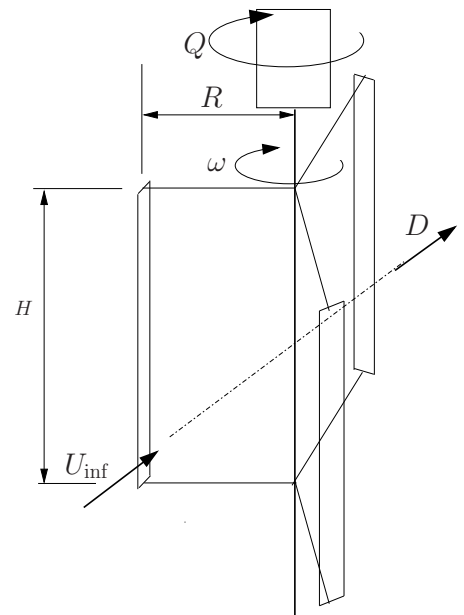


FIG. 1 – Turbine à axe de rotation vertical

## 2 Pourquoi une nouvelle modélisation numérique ?

Afin d'optimiser l'architecture des parcs d'hydroliennes à l'échelle marine, il est nécessaire de recourir à la simulation numérique. L'outil de modélisation doit être suffisamment précis pour prédire les caractéristiques principales des turbines (puissance et traînée) et prendre en compte leurs interactions. Il doit aussi être simple et rapide pour simuler de nombreuses machines.

Les modèles macroscopiques existants (Paraschivoiu 2002, Templin 1974) utilisent des bilans de masse et quantité de mouvement pour donner les performances de turbines à axe transverse en fonction de la vitesse de rotation des pales. Ils sont cependant limités dès lors que la solidité des machines dépasse 0.25 alors que les hydroliennes ont

une solidité comprise entre 0.5 et 1 (Paraschivoiu 2002, Gorlov 1998). Leur domaine d'application est ainsi restreint à l'éolien et c'est pourquoi un outil CFD a été spécifiquement développé. L'idée principale de cet outil est de coupler un solveur 2D/3D à une description macroscopique de la turbine. Les forces aérodynamiques sur les pales, calculées à partir du champ de vitesses, sont moyennées dans le temps et insérées comme termes sources dans les équations de moments. Ils sont actualisés à chaque itération du solveur. Dans la suite, la version 2D du code, bien adaptée à l'architecture en colonnes est utilisée.

### 3 Validation du code pour une tour d'hydroliennes

Pour valider notre code, nous avons à disposition des résultats numériques d'une éolienne de type Darrieus testée par le laboratoire SANDIA (Sheldhal & Blackwell 1977). L'éolienne de solidité  $s = NC/R = 0.25$  ( $C$  étant la corde de pale) tourne à vitesse de rotation constante pour différentes vitesses du courant incident. Pour chaque point de fonctionnement caractérisé par une vitesse spécifique fixée  $\lambda = \omega R/U_{inf}$  nous pouvons rigoureusement comparer simulation et expérience à condition de conserver le nombre de Reynolds basé sur le diamètre de turbine  $Re_D = U_{inf}D/\nu$ , le nombre de Reynolds de pale  $Re_C = R\omega C/\nu$  et la solidité.

La figure 2 présente les résultats du code pour 3 turbines de différentes solidités (0.25 ; 0.72 ; 1). Le cas  $s = 0.25$  est comparé avec l'expérience SANDIA. Une légère variation des coefficients aérodynamiques du profil de pale nous permet de caler les résultats numériques sur l'expérience pour des vitesses spécifiques supérieures à celle correspondant au maximum de puissance. Pour des valeurs de  $\lambda$  en deçà, il est difficile de juxtaposer les 2 courbes. Cette différence peut s'expliquer par le fait que l'on se situe dans une zone de décollement dynamique et que le code ne prend pas en compte ce phénomène physique. Par ailleurs, le rendement maximum est fixé à 42% alors que l'expérience SANDIA conduit à une valeur de 32%. Il est en effet raisonnable de penser que le rendement d'une turbine dans un écoulement bidimensionnel est supérieur de 10% à celui de la turbine expérimentale, isolée dans un écoulement 3D, à cause du confinement vertical imposé par l'hypothèse 2D. Une version 3D du code a permis de valider cette hypothèse. On notera que le code représente bien l'effet attendu du changement de solidité puisque, par exemple, la turbine de solidité 0.72 atteint un rendement maximum de 37.5% pour une vitesse spécifique de  $\lambda \approx 2.5$ .

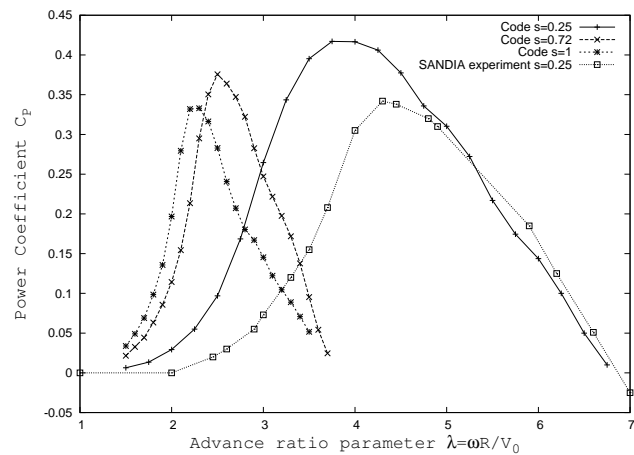


FIG. 2 – Rendement  $C_P$ , comparaison entre code et expérience  $Re_C = 2.8 \cdot 10^5$

#### 4 Modélisation d'un faisceau de tours alignées

Dans la perspective de fermes marines, nous devons penser à la meilleure configuration possible de tours en termes de rendement, place occupée, prix et impact environnemental. Cet objectif ambitieux se limite dans cette partie à l'étude du rendement moyen de 5 tours alignées.

Dans ce cas précis, la seule variable que nous laissons pour l'optimisation est l'espacement entre tours (exprimé en diamètre de turbine). La figure Fig. 4 présente un arrangement de 5 tours espacées de 2 diamètres de turbines  $E = 2D_t$ . Chaque turbine de solidité 0.72 tourne à la vitesse spécifique optimale de  $\lambda = 2.65$  correspondant à la configuration isolée (Fig. 2). On remarque sur cette figure que les 2 tours extérieures sont les moins efficaces tandis que celle du centre bénéficie de l'effet d'obstacle de ces voisines. Le rendement moyen est augmenté de 10% par rapport à une turbine isolée.

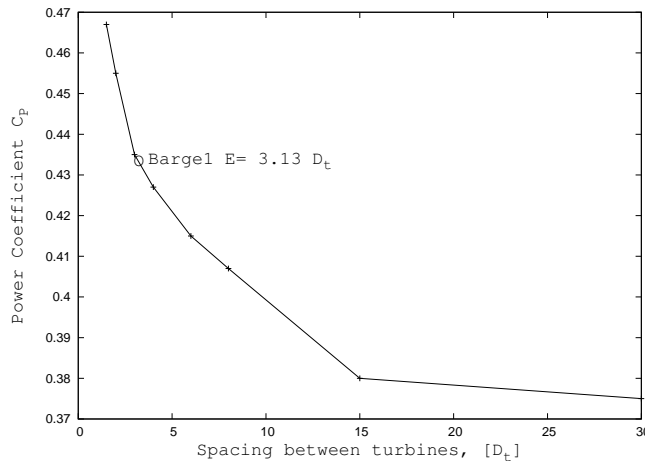


FIG. 3 – Rendement maximum  $C_p$  pour différents espacements,  $Re_D = 0.3 * 10^6$

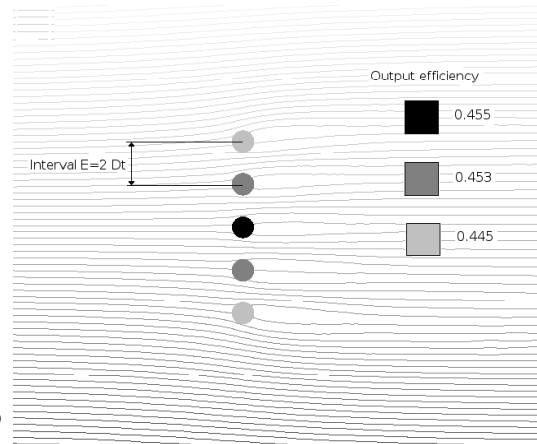


FIG. 4 – Rendement des tours et lignes de courant,  $Re_D = 0.3 * 10^6$ ,  $\lambda = 2.65$ ,  $E = 2D_t$

Sur la figure Fig. 3, le rendement moyen maximum a été tracé pour différents espacements. On peut remarquer que plus on approche les tours, plus ce rendement est élevé même si le cas le plus favorable n'est pas réalisable en pratique puisqu'il correspond à des tours jointes.

#### 5 Modélisation de fermes d'hydroliennes

Dans cette partie, nous allons aborder un aspect de l'optimisation du placement des barges constituant une ferme marine. Les barges sont constituées de 6 tours de 3 machines de solidité 0.72. L'espacement entre tours est de  $3.13 D_t$ , ce qui fait une barge d'une largeur totale de 50 m. Cette configuration présente possède un rendement moyen supérieur de 6% à celui d'une tour isolée ( voir Fig. 3). Les simulations sont réalisées

pour une valeur unique de la vitesse spécifique  $\lambda = 2.65$  et la vitesse du courant amont est de  $1m/s$ . Enfin, le maillage comporte environ 100000 cellules et le temps de calcul sur un bi-processeur 1.2 GHz est d'environ 1200 s.

Les configurations en bataille et en quinconce sont testées (Fig. 5). Dans chaque cas, on regarde l'influence de l'espacement longitudinal  $l$  et latéral  $L$  sur la performance du parc comme dans l'étude réalisée par EDF (Peyrard, Buvat, Lafon & Abonnel 2006). Dans la suite  $D$  équivaut à la largeur d'une barge.

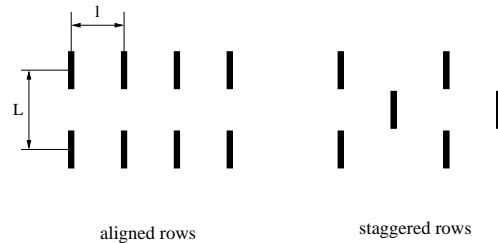


FIG. 5 – configurations testées

Le tableau Tab. 1 représente les pertes de puissance, pour la configuration en bataille, de la ferme modélisée par rapport à la ferme de référence composée de 192 tours indépendantes. La conclusion est simple : plus les barges sont rapprochées, plus les pertes sont grandes. En effet, les barges en aval étant dans le sillage des barges en amont, elles reçoivent moins d'énergie cinétique et ont donc un rendement plus faible. Par exemple on a une perte de 35% pour la configuration  $2D/10D$  alors que l'on enregistre seulement 8.6% de perte pour le cas  $8D/30D$  pour lequel le fluide récupère la plupart de son énergie cinétique entre les rangées.

| l/L | 2D   | 4D   | 6D   | 8D   |
|-----|------|------|------|------|
| 10D | 35   | 30.6 | 30.4 | 29.5 |
| 20D | 31.3 | 18.5 | 14.8 | 14.1 |
| 30D | 28.9 | 16.1 | 10.4 | 8.6  |

TAB. 1 – Perte de puissance par rapport à la ferme de référence [%], bataille,  $E = 3.13D_t$

| l/L | 2D   | 4D   | 6D  |
|-----|------|------|-----|
| 5D  | 28.6 | 8.9  | 8.6 |
| 10D | 31.3 | 9.7  | 5   |
| 20D | 31.8 | 16.7 | 7.6 |

TAB. 2 – Perte de puissance par rapport à la ferme de référence [%], quinconce,  $E = 3.13D_t$

Pour les pertes d'énergies des lignes arrières, il est possible de décaler une ligne sur 2 pour que les barges ne soient pas dans le sillage direct des barges juste en amont. C'est la configuration en quinconce. On remarque que cet arrangement devient très intéressant si l'espacement latéral dépasse  $4D$ . La configuration en quinconce semble donc être une bonne candidate pour de futurs parcs marins. Cependant, cette analyse ne tient pas compte de facteurs économiques (coût des machines, de l'installation, de l'espace) et environnementaux (espace disponible, modification du courant) qui seront déterminant pour le choix d'un futur parc.

## 6 Conclusion

Nous avons développé un outil de simulation robuste et puissant, bien adapté pour la simulation de tours d'hydroliennes du fait de son caractère bidimensionnel. Les résultats de ce code ont été validés par une expérience sur une éolienne Darrieus. Il a ensuite été utilisé pour l'optimisation d'un faisceau de tours alignées. On a vu que le rapprochement des tours profite au rendement moyen de la barge. Cependant, le problème de la configuration optimale n'est pas résolu pour autant puisqu'on a limité l'étude à une géométrie (tours alignées), un nombre fixé de tours (5) et une vitesse spécifique donnée. De plus on ignore encore la distance minimale à respecter entre les tours. Une série de simulations sur des fermes aux géométries différentes a confirmé l'intuition que les "petites" fermes perdent beaucoup d'énergie alors que les plus grosses permettent au fluide de récupérer plus d'énergie cinétique entre les barges et sont donc plus intéressantes d'un point de vue rendement. La disposition en quinconce semble la plus intéressante au delà d'un certain espacement latéral ( $4 D$ ). Il est évident qu'une étude technico-économique et environnementale est nécessaire pour que les conclusions de l'étude soient utilisables pour un dimensionnement réel. D'un point de vue technique, la possibilité du code de faire tourner les machines à différentes vitesses spécifiques n'a pas été pleinement exploitée. En effet, le  $\lambda$  optimum dépend de la vitesse du flux incident et n'est pas le même pour toutes les turbines au sein d'une barge ou d'une ferme. Ainsi, la prise en compte de ce degré de liberté supplémentaire devrait conduire à des optimisations plus fines. D'un autre côté, une version 3D du code a été développée. Elle montre l'impact positif de l'arrangement en colonne pour le rendement. Cette nouvelle version pourrait être utilisée pour modéliser l'unité barge.

## Références

- Antheaume, S., Maître, T., Buvat, C. & Abonnel, C. (2006), Optimisation of a vertical axis water turbine farm, in 'Ocean Energy International Conference'.
- Gorlov, A. M. (1998), 'Helical turbines for the gulf stream : conceptual approach to design of a large-scale floating power farm', Marine Technology **35**(3), 175–182.
- Maître, T. & Achard, J.-L. (2003), 'Une source d'énergie renouvelable possible : Les hydrauliques', Revue de l'Energie (Numéro spécial 546), 315–319.
- Paraschivoiu, I. (2002), Wind Turbine Design, Polytechnic International Press.
- Peyrard, C., Buvat, C., Lafon, F. & Abonnel, C. (2006), Investigations of the wake effects in marine current farms through numerical modelling with the telemac system, in 'Ocean Energy International Conference'.
- Sheldhal, R. E. & Blackwell, B. F. (1977), Free-Air Performance Tests of a 5-Meter Diameter Darrieus Turbine, SANDIA Laboratories.
- Templin, R. (1974), 'Aerodynamics performance theory for the ncr vertical-axis wind turbine', N.A.E Report LTR-LA-160.