

## Prévision des performances aérodynamiques d'un nouveau type d'éolienne à axe vertical : le rotor à contrevoiles

Jean-Luc Menet, Nachida Bourabaa

Laboratoire de Mécanique et d'Énergétique – Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis  
Le Mont Houy – 59313 Valenciennes Cedex 9 – France  
Jean-Luc.Menet@univ-valenciennes.fr

### Résumé :

Le rotor Savonius présente de nombreux avantages, mais il a un rendement aérodynamique faible et un moment mécanique sur l'axe très instable. Nous présentons ici les résultats de simulations numériques de l'écoulement autour de rotors dérivés du rotor Savonius, dont l'objectif est d'augmenter la valeur du moment et d'en améliorer la stabilité. Pour cela, nous ajustons plusieurs paramètres géométriques, en particulier le recouvrement des aubages et leur agencement. Ensuite, nous étudions des rotors à voilures désaxées. Les résultats tirés de plusieurs configurations montrent que le rotor à deux voilures, que nous appelons *rotor à contrevoiles*, semble le plus performant.

### Abstract :

The Savonius rotor is a slow running vertical axis wind turbine, the advantages of which are numerous ; however, it has a poor aerodynamic efficiency and a very unsteady mechanical torque. We present the results of numerical simulations of the flow around derived Savonius rotors, aiming to raise and stabilise the torque. It is the reason why several geometrical parameters have been adjusted, in particular the overlap of the paddles and their respective position. Then a rotor with displaced blades is studied. The results obtained on few configurations of rotors show that the two-bladed rotor, called *reverse paddles rotor*, seems to be the most efficient.

### Mots-clefs :

**rotor Savonius ; rotor à contrevoiles ; CFD, optimisation**

### 1 Introduction

Avant leur implantation sur site, les éoliennes sont dimensionnées pour un point de fonctionnement nominal, c'est-à-dire en fonction de la puissance attendue pour une vitesse de vent donnée. Dans la plupart des cas, le choix se porte sur les éoliennes de meilleur rendement, c'est-à-dire sur les éoliennes rapides à axe horizontal bi- ou tripales (Wilson et Lissaman, 1974).

Or, bien qu'ayant des performances aérodynamiques indéniables, ce type d'éolienne n'est pas nécessairement celui qui permet d'extraire le maximum d'énergie du vent. Il a d'ailleurs été montré que l'utilisation d'un critère de choix purement mécanique conduit paradoxalement à annoncer que les éoliennes lentes, en particulier celles à axe vertical, peuvent extraire davantage d'énergie que les éoliennes rapides (Menet et Ménart, 2001).

Parmi les éoliennes de ce type, le rotor Savonius (1931) est le plus connu. Il s'agit d'un rotor à traînée différentielle qui, malgré un rendement relativement faible, présente plusieurs avantages indéniables (Martin, 1997). Par exemple un rotor Savonius ne nécessite aucun dispositif d'orientation ; son couple statique important lui permet de démarrer aux vitesses de vent faibles, lorsque les éoliennes rapides restent le plus souvent immobiles ; sa grande robustesse lui permet de supporter les vitesses de vent élevées, lorsque les éoliennes rapides doivent être freinées ou arrêtées pour des raisons de sécurité ; il est enfin aisé à réaliser, et donc

moins coûteux en cas de production en série. Par ailleurs, depuis plusieurs années, de nombreuses études ont permis d'améliorer sensiblement les performances des rotors Savonius (Schedahl et al. 1978, Ushiyama et Nagai 1988, Menet 2004, Menet et Cottier 2003, Menet et Bourabaa 2004).

A notre sens, le principal inconvénient du rotor Savonius, en particulier pour la production d'électricité, n'est donc pas le rendement proprement dit mais l'instabilité du moment mécanique sur l'axe, dû à l'instationnarité de l'écoulement interne. Pour le stabiliser, certains auteurs proposent d'utiliser des rotors à 3 aubes (Sheldahl et al. 1978, Saha et Rajkumar 2006) mais les résultats ne sont pas probants et les performances énergétiques sont parfois dégradées.

Une précédente étude nous a permis de proposer des pistes d'amélioration de la géométrie du rotor Savonius (Menet 2006). En optimisant à la fois le recouvrement des aubes et leur inclinaison relative, nous avons noté une amélioration significative du moment mécanique moyen sur l'axe. Mais cette augmentation se fait au détriment de la stabilité angulaire.

C'est dans la double optique de l'augmentation du rendement aérodynamique et de la stabilisation du moment sur l'axe, que nous proposons ici de désaxer le rotor, transformant ainsi le module en rotation en une voilure. Cette solution permet en outre d'alléger la structure du rotor tout en maintenant son principal avantage : sa rusticité, et donc sa facilité de réalisation.

Ces études ont été réalisées au moyen du code de calcul volumes finis Fluent<sup>1</sup>.

Dans la suite, nous décrivons le rotor Savonius et les différents types de rotors dérivés dont nous présentons les résultats. Puis nous proposons un choix de rotor à voilures désaxées, que nous appelons *rotor à contrevoile*.

## 2 Description et performances des rotors étudiés

### 2.1 Rotors classiques

Le rotor Savonius (1931) est constitué de deux demi-cylindres décalés l'un par rapport à l'autre et tournant autour d'un axe perpendiculaire au vent (figure 1). Dans la suite, nous appelons *module Savonius* ce dispositif, dans la mesure où il est utilisé comme voilure sur un rotor désaxé (Figure 2). Un module dérivé est également étudié (figure 3), sur la base de la variation des trois paramètres géométriques suivants : le recouvrement principal  $e$ , le recouvrement secondaire  $e'$ , et l'angle  $b$  entre les aubes.



FIG. 1 – Rotor Savonius

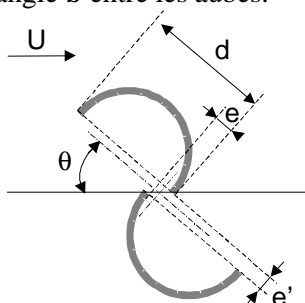


FIG. 2 – module Savonius

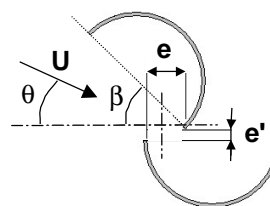


FIG. 3 – module dérivé

Le coefficient de vitesse d'un rotor de rayon  $R$  est défini par :

$$\lambda = \frac{\omega R}{U}. \quad (1)$$

Pour un rotor de hauteur  $H$  soumis à un vent incident de vitesse  $U$ , la puissance mécanique  $P$  et le moment sur l'axe  $M$  s'écrivent :

$$P = C_p \rho R H U^3, \quad (2)$$

<sup>1</sup> <http://www.fluent.com>

$$M = C_m \rho R^2 H U^2, \quad (3)$$

où  $C_p$  et  $C_m$  sont respectivement les coefficients de puissance et de moment. Notons que pour le module dérivé, le rayon  $R$  du rotor dépend de l'angle  $\beta$ .

Dans la suite, nous appelons *module Savonius conventionnel* le module dont les paramètres géométriques  $e$  et  $e'$  valent respectivement  $d/6$  et 0. Les courbes caractéristiques de ce module utilisé comme rotor (valeurs de  $C_p$  et  $C_m$  en fonction de  $\lambda$ ) sont reportées sur la figure 4-a (Martin 1997). La figure 4-b représente le coefficient de moment statique de ce rotor en fonction de l'incidence du vent ; notons que la valeur moyenne de ce coefficient est de l'ordre de 0,33.

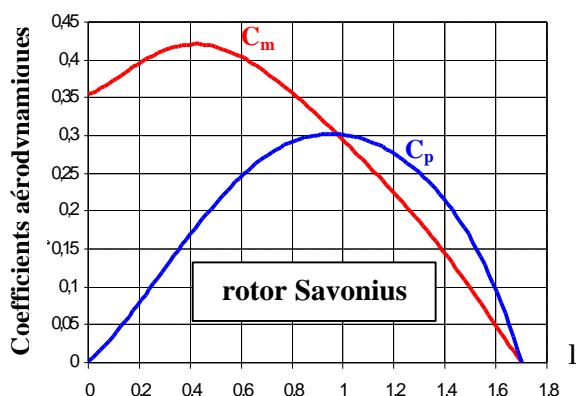


FIG. 4a – coefficients aérodynamiques

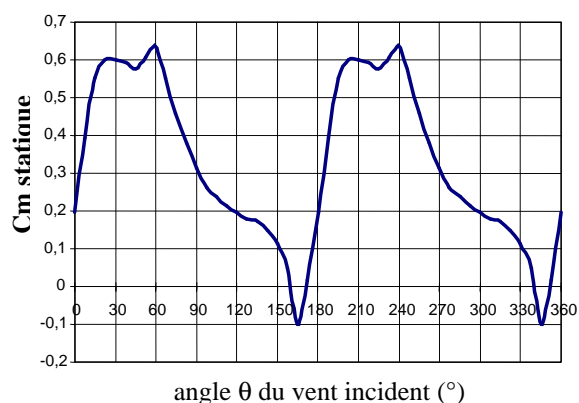


FIG. 4b – coefficient de moment statique

## 2.2 Rotors à voilures

Un rotor à voilures est une éolienne à axe vertical comportant un ou plusieurs modules dérivés du rotor Savonius placés le long de « bras » tournant autour d'un axe décalé par rapport à l'axe principal du rotor (Figures 5a et 5b). Les voilures utilisées peuvent être soit des modules Savonius classiques, soit des modules dérivés du rotor Savonius. Lorsque le rotor est équipé de deux voilures placées de part et d'autre de l'axe de rotation, nous l'appelons *rotor à contrevoiles*.

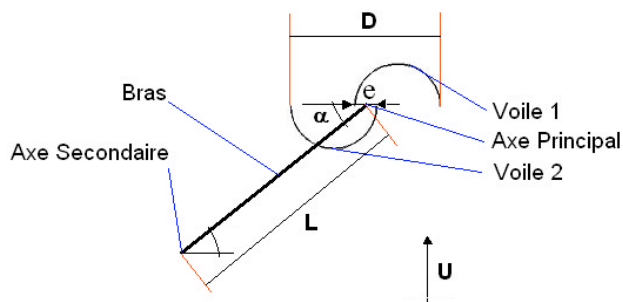


FIG. 5a – bras de rotor à voilures



FIG. 5b – exemple : rotor à trois voilures

## 3 Etudes numériques et résultats

### 3.1 Modèle numérique

Le modèle utilisé dans cette étude est celui d'un rotor de hauteur infinie, ce qui a permis de s'affranchir des effets tridimensionnels et de mener une étude en 2D. Nous nous sommes attachés plus particulièrement à estimer le rôle du recouvrement relatif  $e/d$ , qui influence largement la structure de l'écoulement, et par conséquent ses performances aérodynamiques.

Le modèle numérique est défini sur la base des géométries de référence (figures 2 et 3). Le maillage obtenu comporte environ 50 000 cellules quadrilatérales et est évidemment raffiné au voisinage des parois ( $y^+ = 30$ ).

Les calculs et le post-traitement ont été menés à l'aide du code par volumes finis Fluent. Afin d'atteindre des résultats fiables avec des temps de calcul acceptables, nous avons utilisé une discrétisation au premier ordre pour les pressions et les vitesses. L'écoulement est supposé isovolume et un modèle de turbulence de type  $k-\epsilon$  standard a été utilisé.

Un calcul en statique de l'écoulement autour de chaque configuration de rotor permet de déterminer la répartition de pression sur les aubes, de laquelle nous déduisons les moments statiques pour diverses valeurs de l'incidence  $q$ .

### 3.2 Rotor Savonius optimisé

Le calcul de l'écoulement autour du *rotor Savonius* classique (figure 2) a pour but de valider la modélisation utilisée en s'appuyant sur les résultats issus de la bibliographie. En particulier, nous avons choisi de comparer nos résultats avec les expériences menées par Blackwell et al. (1978). Le nombre de Reynolds utilisé dans notre simulation vaut :  $Re_D = 1,56 \cdot 10^5$ . Nous avons testé plusieurs valeurs du recouvrement relatif et constaté que la valeur  $e/d = 0,242$  fournit le meilleur coefficient de moment statique moyen. Ce résultat est en accord avec les préconisations de Ushiyama et Nagai (1988) qui conseillent d'utiliser des valeurs du recouvrement relatif comprises entre 20% et 30%.

A titre d'exemple, nous donnons une représentation du champ de pression (exprimée en Pascals) autour du rotor pour la configuration angulaire  $q = 90^\circ$  (figure 6). C'est de ce type de représentation que peuvent être déduites les sollicitations mécaniques sur les aubages en fonction de  $q$ , et par conséquent les valeurs angulaires du moment statique sur l'axe. (figure 7).

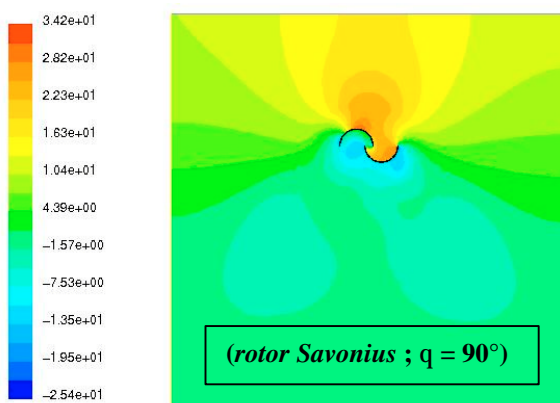


FIG. 6 – champ de pression statique

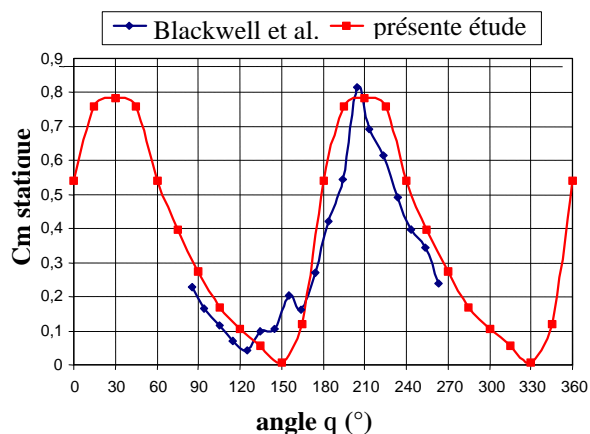


FIG. 7 – Coefficient de moment statique

On note que notre simulation est très proche des résultats expérimentaux. Le coefficient de moment atteint une valeur crête de 0,8 et une moyenne de 0,36 supérieure de 10% à celle obtenue pour le *rotor Savonius conventionnel*. Une étude de sensibilité sur les modèles de turbulence permettrait d'affiner cette validation. Des calculs utilisant des schémas d'ordre supérieur sont aussi à réaliser.

### 3.3 Rotors dérivés du rotor Savonius

Le *module Savonius dérivé* est représenté sur la figure 3. Nous proposons d'ajuster deux paramètres géométriques : le recouvrement principal  $e$  et l'angle  $b$  entre les diamètres des aubes. La vitesse  $U$  de l'écoulement est encore repérée au moyen de l'angle  $q$ . Afin d'étudier l'influence de l'angle d'inclinaison  $b$  des aubes sans multiplier les simulations, nous avons choisi de le faire varier dans la plage qui nous paraissait la plus propice à l'optimisation du coefficient de moment statique, à savoir  $55^\circ < b < 75^\circ$ , pour deux valeurs de l'angle  $q$  du vent :  $q=90^\circ$  et  $q=45^\circ$ . Le meilleur compromis correspond à un angle  $b=55^\circ$  (table 1).

Nous avons ensuite étudié l'influence du recouvrement principal  $e$ , là encore pour les deux valeurs  $q=90^\circ$  et  $q=45^\circ$  de l'angle d'incidence du vent, et nous avons pu déterminer que le maximum du moment statique moyen optimum était obtenu pour :  $e/d=0,242$ .

Les résultats précédents ont conduit à effectuer une simulation complète du moment statique sur l'axe pour le *module Savonius dérivé* ainsi optimisé :  $b=55^\circ$  ;  $e/d=0,242$  ;  $e'=0$ . Les résultats de cette simulation sont reportés sur la figure 8.

On constate que le module Savonius dérivé induit des valeurs maximales du moment statique beaucoup plus élevées que sur le *rotor conventionnel*, même s'il introduit aussi des valeurs faibles et négatives de ce moment, le tout avec une variation angulaire très intense. Cela étant, la valeur moyenne du moment est sensiblement améliorée ( $C_m=0,48$ , soit 45% de plus que pour le *rotor Savonius conventionnel*).

$\theta$ (°)	$\beta$ (°)	$C_m$
90	55	0,10
90	60	0,01
90	65	0,05
90	70	0,11
90	75	0,13
45	55	0,22
45	60	0,15
45	65	0,07
45	70	0,07
45	75	-0,03

TABLE 1 : Influence de  $b$

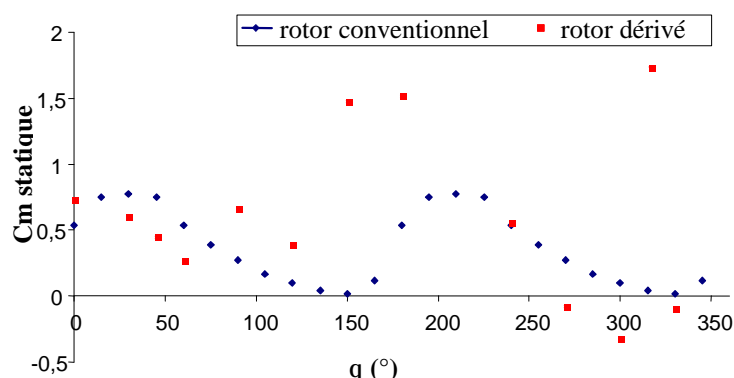


FIG. 8 – Coefficient de moment statique

### 3.4 Rotors à voilures

Nous étudions ici des rotors à voilures, schématisées sur la figure 5-a. A cause de la répartition symétrique des efforts, le moment résultant d'un rotor à voile Savonius classique est nul en moyenne. Nous pourrions éviter cela en asservissant la voile afin qu'elle fournisse toujours un couple maximum en fonction de la position de la voile par rapport au vent. Pour simplifier la régulation du rotor, nous préconisons plutôt une autre solution, qui consiste à utiliser la voile modifiée représentée sur la figure 3, dont le comportement aérodynamique a été décrit dans le paragraphe 3.3.

Les rotors à une et deux voilures étudiés ont un rapport  $L/d=0,87$  ; le rotor à trois voilures a un rapport  $L/d=1,75$ . L'ensemble des résultats donnant la variation angulaire du coefficient de moment statique en fonction de l'angle  $q$  d'incidence du vent sont repris sur la figure 9.

Les valeurs moyennes pour les rotors à une, deux ou trois voilures valent respectivement  $C_{m1}=0,2997$ ,  $C_{m2}=0,4147$  et  $C_{m3}=0,2738$ . Il est clair qu'un nombre élevé d'aubages stabilise la valeur angulaire du moment, mais cela se fait en partie au détriment de la valeur moyenne. Un bon compromis entre une valeur élevée des coefficients de moment et leur stabilité angulaire semble être un rotor à deux voilures, que nous appelons *rotor à contrevoiles*, pour lequel le coefficient de moment vaut :  $C_{m2}=0,4147$ . Cette valeur est environ 25% plus élevée que celle obtenue pour le *rotor Savonius conventionnel*. De plus, le moment mécanique sur l'axe est beaucoup plus stable et ne présente jamais de valeur négative. On peut en conclure que le rotor à *contrevoiles* pourra toujours démarrer, quelle que soit la direction initiale du vent.

Ces valeurs encourageantes du moment statique pour une configuration qui n'a pas été optimisée laissent présager non seulement d'un comportement aérodynamique plus stable que celui du *rotor Savonius conventionnel*, mais aussi des rendements sensiblement améliorés, même si l'étude en dynamique n'a pas été effectuée. Notons qu'un rotor à *contrevoiles* présente l'intérêt de ne pas alourdir la structure de l'éolienne, tout en restant de conception très simple.

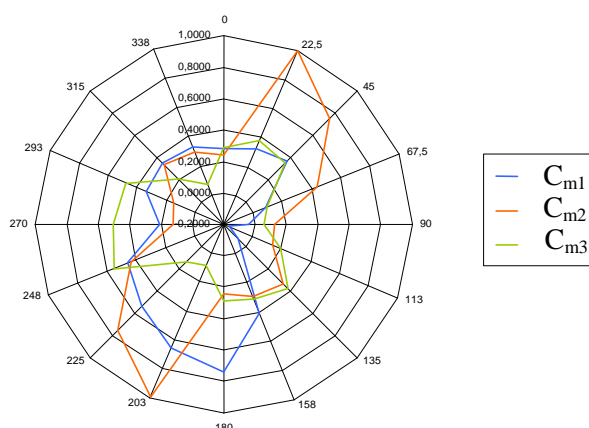


FIG. 9 – Coefficients de moment statique sur les rotors à voilures

#### 4 Conclusions

La présente étude nous a permis de tester différentes configurations d'éoliennes à axe vertical. Les simulations effectuées sur le rotor Savonius nous ont permis de valider les modèles utilisés, et de déduire une configuration optimale pour le recouvrement relatif :  $e/d = 0,242$ . Un rotor Savonius dérivé a ensuite été testé, ce qui nous a permis de proposer un angle d'inclinaison des aubes :  $b=55^\circ$ . Nous avons ensuite testé plusieurs configurations de rotors à voilures ; les premiers résultats montrent une augmentation et une stabilisation significative du moment mécanique sur l'axe, en particulier pour le rotor à deux voilures que nous appelons rotor à contrevoiles. Le travail doit être poursuivi par une optimisation de l'angle  $b$  et de la position des voilures (en faisant varier le rapport  $L/d$ ), et par une étude en dynamique.

#### Références

- Martin, J. 1997 Energies éoliennes. *Techniques de l'Ingénieur B1360*, France
- Menet, J.-L. 2004 A double-step Savonius rotor for local production of electricity: a design study. *Ren. En.* **29**, 1843-1862
- Menet, J.-L. 2006 Wind Energy : Aerodynamic behaviour of a new type of slow-running VAWT, Springer-Verlag, chap 43
- Menet, J.-L., Bourabaa, N. 2004 Increase in the Savonius rotors efficiency via a parametric investigation. European Wind Energy Conference, London
- Menet, J.-L., Cottier, F. 2003 Étude paramétrique du comportement aérodynamique d'une éolienne lente à axe vertical de type Savonius. 16<sup>è</sup> Congrès Français de Mécanique, Nice
- Menet, J.-L., Ménart, B. 2001 Une procédure de comparaison de quelques éoliennes classiques basée sur l'utilisation du critère  $L-\sigma$ . 15<sup>è</sup> Congrès Français de Mécanique, Nancy
- Saha U.K., Rajkumar M.J. On the performance analysis of Savonius rotor with twisted blades. 2006 *Ren En* **31**: 1776-1788
- Savonius, S.J. 1931 The S-rotor and its applications. *Mech En.* **53-5**, 333-337
- Sheldahl R.E., Blackwell B.F., Feltz L.V. 1978 Wind Tunnel performance data for two- and three-bucket Savonius rotor. *Journal of Energy* 2-3 160-164
- Ushiyama, I., Nagai, H. 1988 Optimum design configurations and performances of Savonius rotors. *Wind Eng.* **12-1**, 59-75
- Wilson, R.E., Lissaman, P.B.S. 1974 Applied Aerodynamics of wind power machines. Research Appl. to Nat. Needs, GI-41840, Oregon State University