

## COEFFICIENTS AÉRODYNAMIQUES D'UNE ÉOLIENNE SAVONIUS

**M. Kammoun Badreddine et A. Fungchui David**  
Faculté des Sciences de Sfax, Département de Physique,  
Labo. de Recherche de Physique Appliquée ( L.R.P.A),  
BP 802, 3018 Rte Soukra, Km 3,5 Sfax, Tunisie  
badre.kamoun@fss.rnu.tn

(Received 11 April 2003 - Accepted 24 April 2004)

### RÉSUMÉ

*Cette étude présente l'évolution des coefficients aérodynamiques (traînée, portance, résultante d'efforts, couple) d'un rotor à axe vertical de type Savonius. Ces évolutions sont données en régime dynamique, en fonction d'une part de l'angle d'incidence et d'autre part de la vitesse de l'écoulement amont et du coefficient de vitesse périphérique.*

*Ce travail repose sur des résultats expérimentaux (Chauvin et al., 1987 ; 1983), complétés par un lissage numérique de type Spline.*

*La détermination de ces coefficients est essentielle pour la compréhension du comportement mécanique de la machine.*

**Mots clés :** éolienne Savonius

### ABSTRACT

*The objective of this paper is to study the trends followed by the aerodynamic coefficients (drag, lift, loading distribution, torque) of a vertical axis savonius rotor. These aerodynamic characteristics have been studied in the dynamic state for different pitch angles on one hand and for different upstream velocities and tip speed ratios on the other hand.*

*The study is based on experimental measurements (Chauvin et al., 1987 ; 1983), followed by a numerical smoothening by cubic splines. The determination of these coefficients is primordial in predicting the mechanical behaviour of the machine.*

**Keywords:** eolian energy, Savonius

Nomenclature :

$\delta$  décalage central  
Re nombre de Reynolds  
R+r rayon de giration du bout de pale  
 $\lambda$  coefficient de vitesse périphérique  
 $\rho$  masse volumique de l'air

- $\alpha$  angle de calage  
 $C_X$  coefficient de traînée  
 $C_Y$  coefficient de portance  
 $C_F$  coefficient de force  
 $C_M$  coefficient de moment  
 $U_0$  vitesse du vent

### INTRODUCTION

Le rotor de Savonius est une éolienne à axe vertical constituée par deux aubes semi-cylindriques et présentant un décalage central (Fig.1).

Cette machine a fait l'objet de nombreuses études essentiellement de nature expérimentale pour évaluer, en fonction des critères géométriques le coefficient de puissance (Chauvin *et al.*, 1987 ; Newman, 1974; Fujisawa and Goroh, 1994 ; Ushiyama *et al.*, 1988) mais aussi pour étudier l'aérodynamique et notamment le sillage tourbillonnaire (Ogawa, 1984 ; Benghrib *et al.*, 1998 ; Botrini *et al.*, 1984).

Cette étude repose sur l'exploitation de résultats expérimentaux (Chauvin *et al.*, 1987 ; Chauvin *et al.*, 1983) que nous avons traités numériquement, dans trois situations différentes: un cas statique et deux cas dynamiques.

- Dans le cas statique la machine est calée à différentes incidences pour une vitesse d'écoulement amont  $U_0=6.5\text{m/s}$  et un nombre de Reynolds  $Re=4,3.10^4$ .

- Dans les deux cas dynamiques, la machine est en rotation sous l'effet d'écoulement amont de vitesse  $U_0$  valant respectivement  $10\text{m/s}$ ,  $Re=6,9.10^4$  et  $12,5\text{m/s}$ ,  $Re=8,7.10^4$ . Les coefficients de vitesse périphérique  $\lambda$  sont de 0,2 dans le premier cas est  $\lambda=0,43$  dans le second cas.

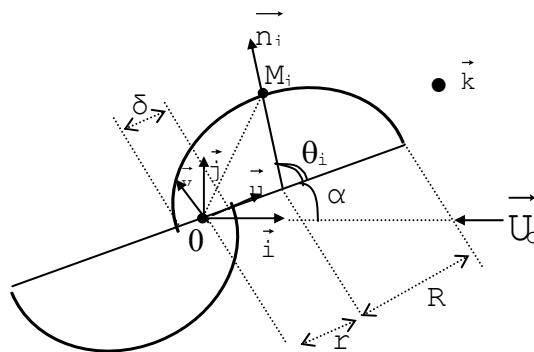


Figure 1.

L'éolienne de type savonius utilisée est constituée par un rotor à axe vertical comportant deux pales semi-cylindriques qui présentent un décalage central  $\delta=28\text{mm}$ .

L'écoulement est de type fluide parfait incompressible. Il est supposé bidimensionnel, le calcul pourra donc être réalisé dans un plan de section droite de la machine. Les profils d'aubes sont assimilés à deux demi-cercles, d'épaisseurs négligeables et décalés l'un par rapport à l'autre, (Fig.1).

**Coefficients aérodynamiques:**

Les forces aérodynamiques  $\vec{F}_i$  appliquées en tout point  $M_i$  sont normales aux éléments de surface de la pale, elles sont donc portées par  $\vec{n}_i$ .

Pour un demi-tour de la machine, on distingue les deux pales par les lettres (A) ou (B). Les forces aérodynamiques sont notées :

$$\vec{F}_i^\beta = \Delta P_i^\beta \Delta S_i \vec{n}_i$$

où  $\beta$  désigne (A) ou (B) selon la pale étudiée.  $\Delta P_i^\beta$  est l'écart de pression instantanée (intérieur-extérieur) au point  $M_i$ .  $\Delta S_i = R \Delta \theta_i$  est l'élément de surface centré au point  $M_i$  et  $\vec{n}_i$  est le vecteur unité normal orienté vers l'extérieur. Pour un angle  $\alpha$  donné, la résultante des forces aérodynamiques sur les aubes (A) et (B) est donnée par :

$$\vec{F} = \sum_{i \in A+B} \vec{F}_i^\beta \tag{1}$$

Le coefficient de forces aérodynamique est alors :

$$C_F = \frac{|\vec{F}|}{(1/2) \rho S U_0^2} \tag{2}$$

Les coefficients de traînée  $C_X$  et de portance  $C_Y$  sont définis par :

$$C_X = \sum_{i \in A+B} \vec{F}_i \cdot \vec{i} / (1/2) \rho S U_0^2 \tag{3}$$

$$C_Y = \sum_{i \in A+B} \vec{F}_i \cdot \vec{j} / (1/2) \rho S U_0^2 \tag{4}$$

Le moment des forces aérodynamiques, en projection sur l'axe  $\vec{k}$ , axe de rotation de l'éolienne et pour un angle d'incidence  $\alpha$ , est donné par :

$$\vec{M}_0 = \sum_{i \in A+B} (\vec{OM}_i \wedge \vec{F}_i) \vec{k} \tag{5}$$

Le coefficient de moment est exprimé par :

$$C_M = \frac{|\vec{M}_0|}{(1/2) \rho S (R+r) U_0^2} \tag{6}$$

On notera que de même que pour le bilan des efforts le moment  $M_0$  est composé de deux termes : une contribution pour l'aube « avançante » et une contribution pour l'aube « reculante ».

On a procédé alors à un traitement numérique des expressions (1) à (5) en remarquant que les aubes jouent un rôle symétrique au cours d'un tour complet. Cette considération permet de limiter l'étude à une demi-rotation de la machine ce qui correspond à  $\alpha \in [0, \pi]$ .

Pour augmenter le nombre de points de calcul, on a utilisé une interpolation numérique par la méthode spline cubique. Le choix de cette méthode a permis d'affiner les résultats.

## RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Les Figures (2), (3) et (4) présentent les résultats obtenus:

Il apparaît que tous les coefficients de traînée sont négatifs, hormis une petite plage d'incidence singulière pour le nombre de Reynolds de  $(8,7.10^4)$ . Les deux profils de  $C_X$  relevés en "statique" ( $Re=4,3.10^4$ ) et machine en rotation à  $\lambda = 0,2$  ( $Re=6,9.10^4$ ) sont très voisins. Cela s'explique par le fait que la machine tourne alors lentement.

Par contre on assiste à une diminution sensible, en valeur absolue, quand le nombre de Reynolds passe à  $Re=8,7.10^4$  et  $\lambda = 0,43$ .

Pour ce qui est des coefficients de portance on note deux phénomènes importants:

- Le premier concerne les deux premières séries d'essais  $Re=4,3.10^4$  et  $Re=6,9.10^4$ . On observe dans ces deux cas que le coefficient de portance présente une contribution positive simultanément sur un même secteur d'incidences initiales qui couvre de  $0^\circ$  à  $50^\circ$  environ. On remarque aussi, pour les mesures statiques un léger effet de portance positif en fin de demi-tour. Cependant sur la majeure partie de cette demi-rotation le  $C_Y$  est négatif.

L'effet global dans ces deux situations donne un  $C_Y$  négatif.

- La seconde constatation est relative uniquement aux essais effectués à un nombre de  $Re=8,7.10^4$  et  $\lambda=0,43$ :

Le coefficient de portance est négatif en permanence sur tout le demi-tour.

On peut donc en conclure que l'on se trouve confronté à un phénomène d'inversion de l'effet de Magnus.

Ce phénomène avait été observé dans le cas du cylindre tournant. Calamote (1984) et Charrier (1979) ont mis en évidence un effet d'inversion de même nature en étudiant l'effet

Magnus sur un cylindre tournant . B. Charrier à trouvé notamment que pour des valeurs de  $\lambda$  variant de 0,1 à 0,5, l'effet de portance peut effectivement devenir négatif, si le nombre de Reynolds est inférieur au nombre de Reynolds critique. Un phénomène de même nature observé avec un rotor de Savonius (Chauvin and Benghrib, 1989) permet donc de faire une analogie avec l'aérodynamique du cylindre tournant.

Pour ce qui concerne le coefficient de moment présenté à la Figure (4), les courbes de  $C_M$  en dynamique apparaissent assez plates ce qui correspond à un couple variant peu sur toute la plage d'incidence  $[0^\circ, 180^\circ]$  Il n'en va pas de même pour le cas statique, pour lequel on note un maximum du couple pour une incidence voisine de  $55^\circ$  . Ceci correspond à l'optimum du couple de démarrage de la machine. A partir de  $\alpha$  voisin de  $120^\circ$  le couple diminue fortement la machine, placée dans les incidences de démarrage  $\alpha \in [147^\circ, 180^\circ]$  démarre moins aisément, et pour  $\alpha$  voisin de  $147^\circ$  ou  $165^\circ$  ; On peut même signaler que le couple de démarrage est nul, cela correspond à une position d'équilibre du rotor.

Remarque : Il n'est pas possible de mettre en évidence l'existence d'un centre de poussée des efforts aérodynamiques.

En effet: si un tel point noté Q existe, il faut que le vecteur  $\vec{OQ}$  satisfasse à la relation vectorielle :

$$\frac{\vec{OQ}}{R+r} \wedge \vec{C}_F = \vec{C}_M \tag{7}$$

où on a noté :  $\vec{C}_F = \vec{F} / (1/2) \rho S U_0^2$

la solution est donnée par :

$$\vec{OQ} = (R+r) \frac{\vec{C}_F \wedge \vec{C}_M}{C_F^2} + \gamma \vec{C}_F ; \gamma \in \mathbb{R} \tag{8}$$

Le point Q appartient alors à une droite qui passe par le point  $\frac{\vec{C}_F \wedge \vec{C}_M}{C_F^2}$  et parallèle au vecteur  $\vec{C}_F$  . C'est l'équation paramétrique d'une droite qui dépend de  $\gamma$  et elle ne peut avoir une solution unique; on ne peut donc définir un point Q . Ce résultat n'est pas surprenant compte tenu du fait que les aubes sont des surfaces gauches.

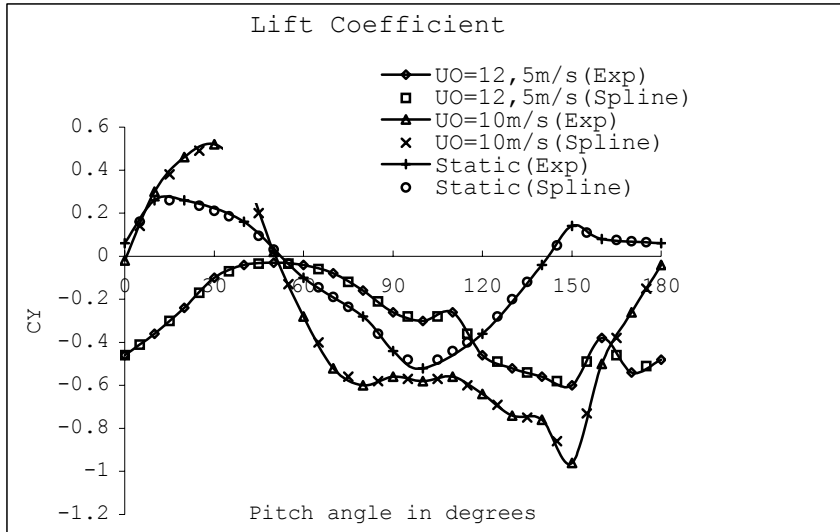


Figure 2.

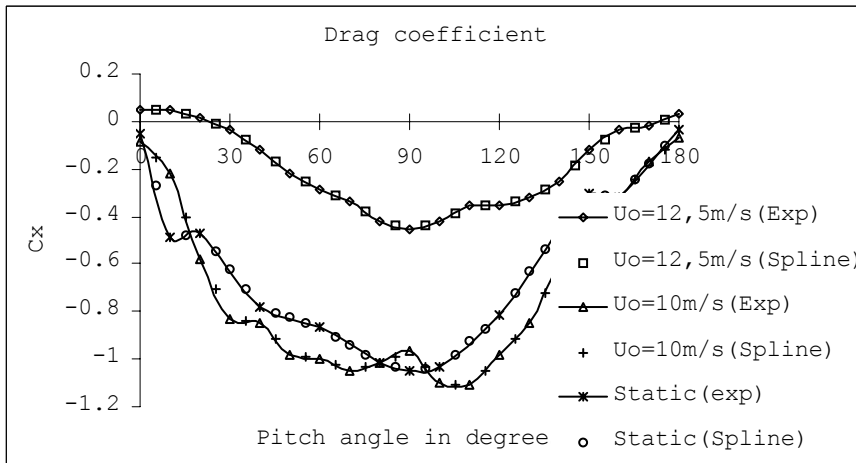


Figure 3.

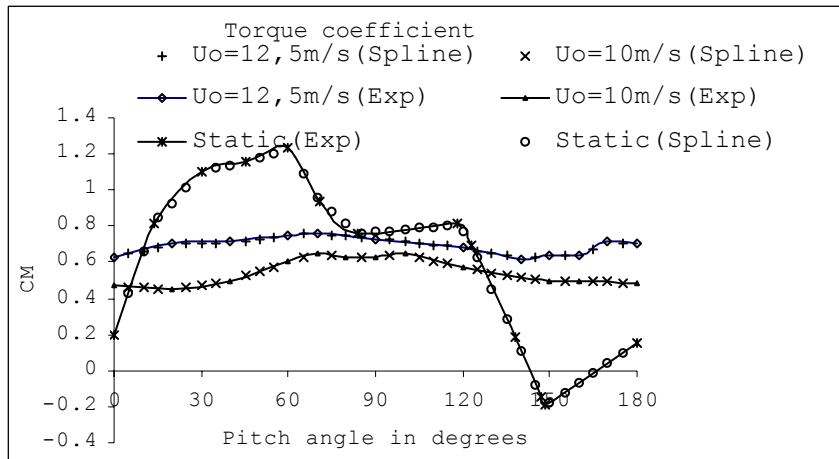


Figure 4.

## CONCLUSION

L'étude de l'évolution des coefficients aérodynamiques d'un rotor éolien de type Savonius, réalisée à partir de données expérimentales et par l'emploi de la méthode numérique Spline a permis d'affiner les différents profils des courbes. On a constaté que les effets d'inversion de portance sur un rotor Savonius sont liés au nombre de Reynolds et aussi aux valeurs du coefficient de vitesse périphérique.

On a pu par ailleurs mettre en évidence les positions d'équilibre de la machine en étudiant les courbes de couple.

De plus la détermination des coefficients de portance, traînée et surtout de force vont nous permettre de conduire une étude sur les phénomènes de vibration du rotor qui sont à l'évidence associés à la dissymétrie de la distribution des efforts aérodynamiques sur les aubes de la machine

## REFERENCES

- Benghrif, D., Ahram, A., Bchir, L. 1998. Description de l'alternance des tourbillons d'un rotor savonius par visualisation en tunnel hydrodynamique. *C.R. Acad.Sci.*, Paris, T. 326, série IIb), pp. 495-500.
- Botrini, M., Beguier, C., Chauvin, A., Brun, R 1984. Système tourbillonnaire engendré par un rotor de savonius. *C.R. Acad.Sci.*, Paris, T. 298, série II, pp. 861-864.

- Calamote, J. 1984. *Effet de la rotation sur les cylindres tournants*. Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle – IMST, Université d'Aix-Marseille II.
- Charrier, B. 1979. *Etude Théorique et Expérimentale de l'Effet Magnus destinée à la Propulsion Eolienne de Navire*. Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Paris VI-1979.
- Chauvin, A., Aouachria, Z., Marchand, O. 1987. Champs des pressions sur les aubes d'une éolienne savonius. Détermination des coefficients de moment et de puissance. Etudes des émissions tourbillonnaires sur les aubes. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 6 (6): 827-842.
- Chauvin, A., Benghrib, D. 1989. Drag and lift coefficient evolution of a Savonius rotor with variable gap. *Experiment in Fluids* (17 January), pp.118-120.
- Chauvin, A., Botrini, M., Brun, R. et Beguier, C. 1983. Evaluation du coefficient de puissance d'un rotor Savonius. *C.R. Acad. Sci.*, Paris, T. 298, série II, pp. 823-826.
- Fujisawa, N. and Goroh, F. 1994. Experimental study on the aerodynamic performance of a Savonius rotor. *ASME. J. Solar Energy Eng.*, 116, pp. 148-152.
- Newman, B. 1974. Measurements on a Savonius rotor with variable gap. *Wind Energy Devices*, pp. 115-136.
- Ogawa, T. 1984. Theoretical study on the flow about Savonius rotor. *J. Fluids Engineering*, 106: 85-91.
- Ushiyama, I., Nagai, H., Shinoda, J. 1988. Optimum design configurations and performance of Savonius rotors. *Wind Engineering*, 12: 59-75.