

Evaluation des Performances Aérodynamiques des Rotors Éoliens à Axe Horizontal

K. Ameer¹, O. Guerri¹ et M. Harhad²

¹ Centre de Développement des Energies Renouvelables, B.P. 62, Bouzaréah, Alger

² Université des Sciences et Techniques de Blida

Résumé - On se propose de présenter les résultats d'une étude numérique qui permet d'évaluer les performances aérodynamiques des rotors éoliens à axe horizontal. Le modèle théorique appliqué est basé sur la méthode tourbillonnaire qui consiste à combiner la théorie de l'aile portante avec la loi de conservation de la quantité de mouvement. Les pertes induites en bouts de pale, les effets du système de freinage ainsi que les effets du gradient vertical de la vitesse du vent sont pris en considération. Pour cette étude, le programme de calcul utilisé est le code PROP qui a été modifié. Les variations du coefficient de puissance, du couple et de la poussée avec la vitesse spécifique sont ainsi calculées. La précision des résultats est améliorée avec l'étude de l'influence du critère de convergence, du nombre de stations, des pertes aux extrémités de la pale et du modèle de freinage. Les effets de certains paramètres de conception tels que le nombre de pale, l'angle de calage, le vrillage, ... sont considérés. Les résultats obtenus sont en bonne concordance avec les valeurs publiées.

Abstract - We proposes to present the results of a numerical study which makes it possible to evaluate the aerodynamic performances of the wind rotors with horizontal axis. The ideal model applied is based on the swirling method which consists in combining the theory of the foil with the law of conservation of the momentum. The losses induced in blade tips, the effects of the brake as well as the effects of the vertical gradient the speed of the wind are taken into account. For this study, the calculation programme used is the code PROP which was modified. The variations of the reactivity power coefficient, the couple and of pushed with specific speed are thus calculated. The precision a the results is improved with the study the influence of the criterion of convergence, of the number of stations, the losses at the ends of the blade and the model of braking. The effets of certain parameters of design such as the number of blade, the angle of chock, the twist... are considered. The results obtained are in good agreement with the values published.

Mots clés: Rotor éolien - Aérodynamique - Méthode tourbillonnaire.

1. INTRODUCTION

L'évaluation des performances aérodynamiques des systèmes de captation de l'énergie éolienne nous permettrait d'effectuer une bonne conception du rotor avec la détermination des efforts mis en jeu. Ceci pourrait pallier dans une certaine mesure aux problèmes de fiabilité généralement rencontrés.

Les méthodes appliquées sont souvent des adaptations des théories de l'aérodynamique des rotors d'hélicoptères en vol stationnaire. Différentes approches ont été utilisées. Nous citerons par exemple la théorie classique du moment axial généralement appliquée pour une étude préliminaire ou simplifiée, la théorie des cascades [1] particulièrement adaptée aux éoliennes lentes, la théorie de la ligne portante [2, 3] ou la théorie de la surface portante [4] qui permettent une évaluation plus précise des performances aérodynamiques des rotors éoliens. Dans notre cas, le modèle retenu est basé sur la méthode tourbillonnaire qui consiste à combiner la théorie de l'aile portante avec la loi de la conservation de la quantité de mouvement [5].

Les variations du coefficient de puissance, du couple et de la poussée avec la vitesse spécifique sont déterminées. Les calculs sont effectués à l'aide du programme PROP [6] qui a été modifié pour la prise en compte des pertes induites en bout de pale, des effets de l'état de freinage ainsi que les effets du gradient vertical de la vitesse du vent. La méthodologie appliquée ainsi que les résultats obtenus sont présentés dans ce qui suit.

2. METHODOLOGIE

Dans la méthode tourbillonnaire, la pale est subdivisée en plusieurs éléments ou stations. Chacun de ces éléments va décrire une sorte d'anneau en tournant. Deux hypothèses simplificatrices sont effectuées :

- Les forces qui agissent sur chaque élément sont dues entièrement à la portance et à la traînée.
- Les différents anneaux produit par chaque élément de pale n'interfèrent pas entre eux.

La méthode consiste alors à déterminer les vitesses de vent induites au niveau de chaque station. Deux facteurs d'interférences sont introduits. Les expressions des facteurs d'interférence des vitesses axiale \mathbf{a} et angulaire \mathbf{a}'

sont obtenues en égalisant, respectivement, les expressions de la force axiale et du couple obtenues par la théorie de l'aile portante et par la loi de conservation de quantité de mouvement.

$$a = 0.5 \left[1 - \sqrt{1 - \frac{\sigma (1-a)^2 \cos^2 \psi}{\sin^2 \varphi} C_L \cos \varphi} \right] \quad (1)$$

$$\frac{a'}{1+a'} = \frac{\sigma \cos \psi C_L}{8 \cos \varphi} \quad (2)$$

avec : σ : solidité. ψ : angle au cône. C_L : coefficient de portance.
 φ : angle compris entre le plan de rotation et la vitesse relative.

Ces facteurs sont déterminés de manière itérative. Les valeurs de l'angle d'attaque et des vitesses relatives locales sont ensuite évaluées. Ce qui nous permet d'en déduire la variation du coefficient de couple C_Q , de puissance C_p et de poussée C_T . Les expressions de ces différents paramètres peuvent être trouvées dans [6]. Les résultats ainsi obtenus sont améliorés par la prise en considération des pertes aux extrémités de la pale ainsi que par le modèle appliqué pour la prise en compte de l'état de freinage.

Pertes aux extrémités de la pale

En pratique des tourbillons se forment aux extrémités de la pale. Ce phénomène entraîne une diminution du couple et par conséquent de la puissance fournis par le rotor. Une bonne approximation des pertes en bout de pale est donnée par le modèle de Prandtl :

$$F_{\text{bout}} = \frac{2}{\pi} \arccos(e^{-f}) \quad (3)$$

$$\text{avec } f = \frac{B}{2} \frac{r_{\text{bout}} - r}{r_{\text{bout}} \sin \varphi_{\text{bout}}} \quad (4)$$

De même, si la pale est fixée au moyeu par l'intermédiaire d'une tige, il s'ensuit des pertes au pied de la pale, F_{pied} similaire à l'expression (3). Les facteurs d'interférences a et a' deviennent alors :

$$a = 1 - \sqrt{1 - \frac{\sigma (1-a)^2 \cos^2 \psi}{\sin^2 \varphi} C_L \cos \varphi} / 2 F \quad (5)$$

$$\text{et } \frac{F a'}{1-a'} = \frac{\sigma C_L \cos \psi}{8 \cos \varphi} \quad (6)$$

F étant le facteur de pertes totales ($F = F_{\text{bout}} \cdot F_{\text{pied}}$).

Etat de freinage

Lorsque la valeur du facteur d'interférence axiale a excède 0.5, l'écoulement loin dans le sillage a tendance à se renverser et s'approche du rotor à partir de l'aval. Ce phénomène appelé état de freinage, implique de fortes interactions visqueuses. Deux modèles empiriques permettent de corriger les résultats obtenus : le modèle classique et le modèle avancé. Dans le modèle classique, le facteur d'interférence axiale pendant l'état de freinage est déterminé à l'aide de la relation suivante :

$$a = \frac{2 U + F - \sqrt{F^2 + 4 U F(1-F)}}{2(U + F^2)} \quad (7)$$

$$\text{avec } U = \frac{\sigma \cos^2 \psi}{8 \sin^2 \varphi} C_L \cos \varphi \quad (8)$$

Le modèle avancé est basé sur une évacuation empirique du coefficient de perte C_H , proposée par Glauert :

$$C_H = 0,889 - 0,444 a F + 1,55 a^2 F^2 \quad (9)$$

L'expression du facteur d'interférence axiale est alors donnée par :

$$a = \frac{0,146 + \sqrt{0,0203 - 0,6427(0,889 - C_H)}}{F} \quad (10)$$

3. RESULTATS

Les calculs concernent un aéromoteur tripale avec les caractéristiques géométriques suivantes :
 Angle au cône : $\psi = 0$, Rayon du cône : 0,256 m, Rayon de la pale : 2 m et Profil : NACA 4412.

La figure 1 montre l'évolution du coefficient de puissance (C_p) en fonction de la vitesse spécifique (λ) pour différentes valeurs du critère de convergence. On remarque qu'à partir d'un critère de 0.01, les valeurs du C_p s'améliorent et que pour des valeurs inférieures à 0.001, les courbes sont presque confondues.

Plusieurs tests sur l'influence du nombre de nœuds ont été effectués comme on peut le voir sur la figure 2. Il est à noter qu'à partir de huit (08) stations, les résultats ne varient plus.

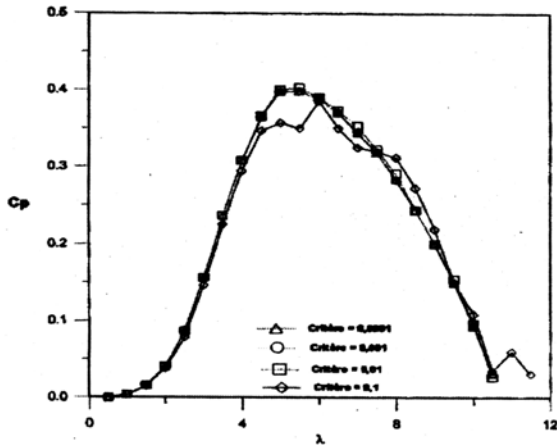


Fig. 1: Influence du critère de convergence

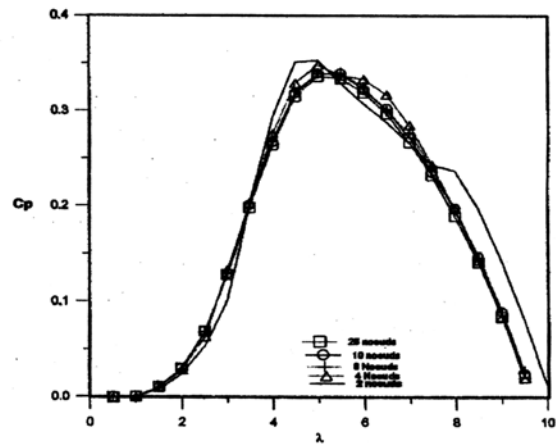


Fig. 2: Influence du nombre de nœuds

Sur la figure 3, le coefficient de puissance est évalué avec et sans considérations des pertes aux extrémités de la pale. On remarque que la courbe avec prise en compte de ces pertes se rapproche le mieux des résultats expérimentaux, notamment au voisinage du C_p maximum.

L'évolution du C_p pour les deux modèles de freinage est représentée sur la figure 4. Ainsi, aux petites vitesses, les résultats ne sont pas influencés par le modèle appliqué pour la simple raison que le rotor éolien ne se trouve pas à l'état de freinage. Par contre, pour les vitesses spécifiques élevées où le champ d'écoulement subit une altération considérable, on note une nette amélioration des résultats avec l'utilisation du modèle de l'état de freinage avance.

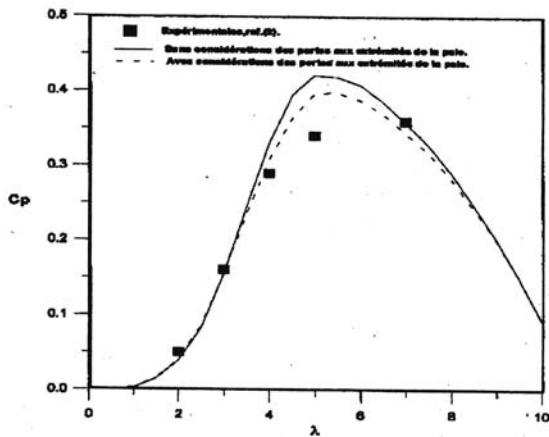


Fig. 3: Effets de la considération des pertes

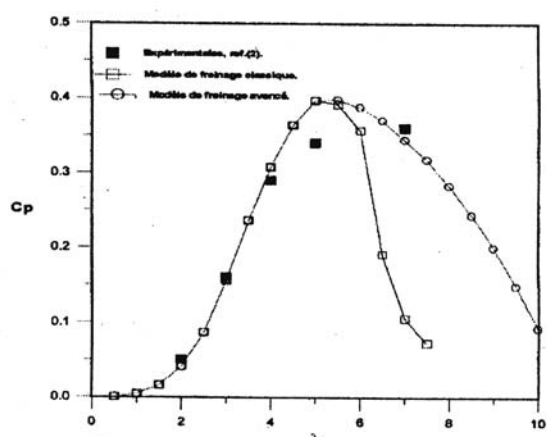


Fig. 4: Effets de la considération du modèle

La figure 5 représente la variation du C_p pour différents nombres de pales. Plus le nombre de pales augmente et plus la courbe a tendance à se décaler vers les basses vitesses avec diminution du C_p maximum. Ce résultat était prévisible. En effet, les éoliennes de pompage multipales dites lentes ont des coefficients de puissances faibles comparées aux aérogénérateurs rapides bi- ou tri- pales.

La figure 6 montre la variation des coefficients de puissance pour différentes valeurs de l'angle de calage (-4° , 0° , 4° et 8°). Il est intéressant de noter que la puissance augmente avec l'angle de calage, mais qu'à partir de 4° , cette tendance s'inverse. Cette diminution de puissance s'explique par le fait que l'écoulement va aborder la pale avec des grands angles d'incidence, ce qui a pour conséquence le décollement des lignes de courant sur ses parois. Ce phénomène agit négativement sur la puissance du rotor.

On voit bien l'intérêt d'un angle de calage variable sur la puissance, puisque on peut améliorer de beaucoup les performances du rotor. Mais le coût d'un tel mécanisme et sa complexité peuvent présenter un handicap de taille pour sa mise en oeuvre.

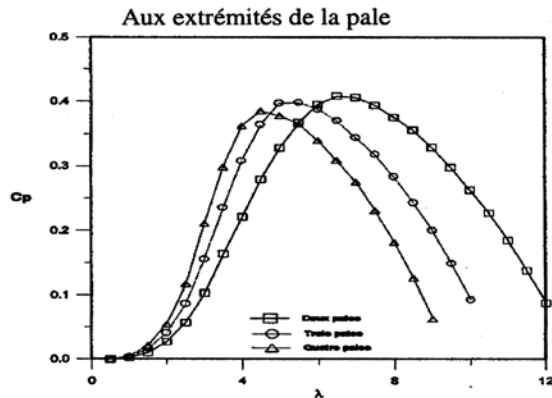


Fig. 5: Variation du coefficient de puissance
Pour différents nombres de pale

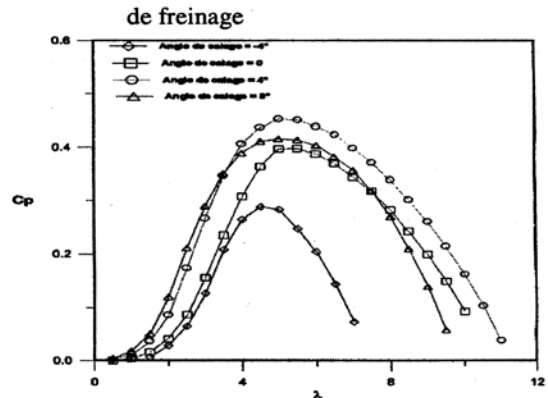


Fig. 6: Variation du coefficient de puissance
pour différents angles de calage

Sur la figure 7, on a reporté la variation du C_p pour deux sortes de pale. Une première pale non vrillée et une deuxième pale vrillée. On remarque que pour les faibles vitesses, le vrillage a peu d'effet sur la puissance, mais dès qu'on dépasse la valeur approximative de $\lambda = 4$, la puissance augmente. Ainsi, le vrillage permet d'améliorer le rendement d'un rotor éolien. Toutefois, il est à noter que le vrillage peut compliquer énormément la réalisation des pales.

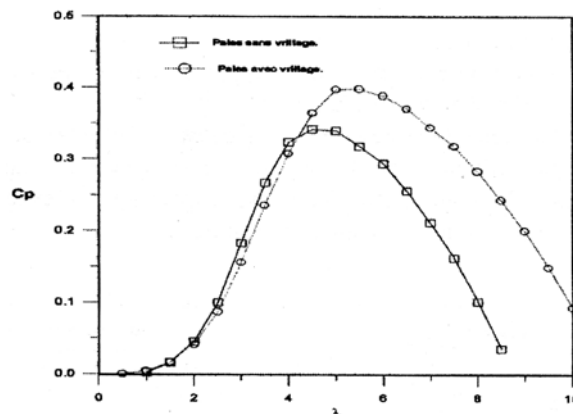


Fig. 7: Effet du vrillage sur le coefficient de puissance

4. CONCLUSION

La présente étude a permis de modéliser les écoulements à travers les rotors éoliens à axe horizontal. La méthode tourbillonnaire a été présentée et ce qu'on notera avec force, ce sont les bons résultats obtenus avec une mise en oeuvre assez simple. Cette étude est applicable aussi bien aux éoliennes de pompage lentes qu'aux aérogénérateurs rapides.

REFERENCES

- [1] M.Q. Islam, 'A theoretical Investigation of the Design of Horizontal-Axis Wind Turbines', Thèse de Doctorat, Université de Brussel, 1986.
- [2] M.B. Anderson, 'A Vortex - Wake Analysis of Horizontal-Axis Wind Turbine and a Comparison with a Modified Blade-Element Theory', Third International Symposium on Wind Energy Systems, Denmark, 1980.
- [3] J. Hernandez and A. Crespo, 'Aerodynamic Calculation of the Performaance of Horizontal-Axis Wind Turbines and Comparison with Experimental Results', Wind Engineering, Vol. 11, N°4, 1987.
- [4] S. Lain, J.A. Garcia and R. Aliod, 'Development of a Lifting Surface 2D Pannel Method to Compute Three Dimensional Pressure Distribution over the Blade of a Horizontal-Axis Wind Turbine', Wind Engineering, Vol. 19, N°1, 1993.
- [5] Y. Mercadier, 'Méthode de Calcul de la Géométrie et des Performances d'une Hélice Eolienne Rapide', Journal of Wind Engineering, Vol. 2, N°1, 1978.
- [6] J.L. Tangler, 'Horizontal-Axis Wind System Rotor Performance Model Comparaison', Rockwell International Corporation Energy Systems Group, USA, 1983.